

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PORTÁTIL PARA MEDIÇÃO DE  
TENSÕES RESIDUAIS EM CAMPO UTILIZANDO A  
HOLOGRAFIA ELETRÔNICA E O MÉTODO DO FURO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

JULIANO BOETTGER

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 1998

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PORTÁTIL PARA MEDIÇÃO DE  
TENSÕES RESIDUAIS EM CAMPO UTILIZANDO A  
HOLOGRAFIA ELETRÔNICA E O MÉTODO DO FURO**

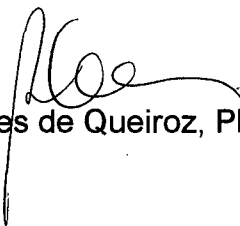
**JULIANO BOETTGER**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng



Abelardo Alves de Queiroz, Ph. D.

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Alexandre Lago, Dr. Rer. Nat.



Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.



Prof. Nelson Back, Ph. D.



Aos meus pais,

Ivo e Marlene Boettger

Aos meus avós,

Ricardo e Anna Manske (*in memoriam*), Roberto e Leonora Boettger

## AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais, pela educação e incentivo dedicados desde à infância;
- Aos meus avós, Anna e Ricardo pelo prazer da convivência durante a infância, pelos cuidados e pela educação recebidos;
- À minha irmã, Larissa, pelo incentivo e pela companhia durante o períodos de graduação e pós-graduação na Universidade Federal de Santa Catarina;
- Ao povo brasileiro, que com seu trabalho, permitiu à CAPES e à FINEP financiarem, respectivamente, a bolsa de estudos e o projeto no qual este trabalho se insere;
- Às empresas Metal Leve, Embraco, Cenpes(Petrobrás) e Copei por acreditarem neste trabalho e investirem em projetos de pesquisa e desenvolvimento num país ainda carente de tais exemplos;
- À Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente ao Laboratório de Metrologia e Automação, e à Fundação CERTI pela disposição de sua infra-estrutura;
- Ao Professor Armando Albertazzi Jr., pela orientação e incentivo transmitidos durante estes anos de convívio;
- Ao Professor Carlos Alberto Flesch, pelos conhecimentos transmitidos durante as disciplinas dos Cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina e que, através da disciplina Medição de Grandezas Mecânicas, despertou o interesse do autor pela área de Metrologia e Instrumentação;
- Aos colegas do Laboratório de Metrologia e Automação, especialmente ao mestrando Cesar Kanda e aos doutorandos Gustavo Daniel Donatelli, Marcos Roberto Rodacoski e Meinhard Sesselmann, pela amizade e contribuições técnicas que foram incorporadas a este trabalho;
- Ao então graduando em Engenharia Mecânica, Eduardo Barreiro de Campos pela participação na primeira etapa deste projeto, auxiliando na implementação de experimentos e elaboração de desenhos;
- Ao graduando em Engenharia Mecânica, Ledo Giuliano Vendruscolo pela participação nas etapas finais do projeto através da elaboração de desenhos de detalhamento e acompanhamento da fabricação e montagem dos componentes do MATER;
- Ao Mestre Engenheiro Carlos Henrique Assuiti, pela coordenação operacional do projeto em que esta dissertação se insere;
- Ao técnico da Fundação CERTI, Danilo José dos Santos, pelas sugestões apresentadas e pela sempre criativa execução das montagens experimentais;
- À Rosana Magali Vieira pela eficiência na solução de questões administrativas;
- Ao técnico da Fundação CERTI, Detlef Werner Brall pela fabricação de vários componentes mecânicos do MATER;
- A todos os colaboradores da Fundação CERTI, especialmente à equipe do Projeto PO001-Módulos Aplicativos para a Estação Holográfica.

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2. Tensões Residuais</b>	<b>4</b>
2.1 Definição	4
2.2 Classificação	4
2.3 Métodos para Avaliação e Medição de Tensões Residuais	6
2.3.1 Principais Técnicas Experimentais para Medição de Tensões Residuais	8
2.3.1.1 Difração de Raios X e Difração de Nêutrons	9
2.3.1.2 Técnicas Acústicas (Ultrassom)	11
2.3.1.3 Técnicas Eletromagnéticas (Análise do Ruído Barkhausen e Correntes Parasitas)	13
2.3.1.4 Métodos Mecânicos	14
<b>3. O Método do Furo</b>	<b>16</b>
3.1 Formulação Matemática	17
3.2 Formulação do Furo Cego	19
3.3 Tensões Residuais Variáveis ao Longo da Profundidade	21
3.4 O Processo de Furação	23
3.5 Fontes de Erros	25
3.6 Método do Furo e Extensometria	28
3.6.1 Procedimento de Ensaio	31
3.6.2 Quantificação dos Resultados	31
3.6.3 Fontes de Erros e Limitações	32
3.7 Método do Furo e Holografia	33
3.7.1 Quantificação dos Resultados	34
3.7.2 Procedimento de Ensaio	37
3.7.3 Fontes de Erros e Limitações	38
3.8 Comparação entre Holografia e Extensometria	38
3.8.1 Influência das Incertezas Associadas às Técnicas de Medição	39

3.8.2	Fatores Inerentes ao Método do Furo e sua Influência sobre as Técnicas de Medição	42
3.8.2.1	Descentragem do Furo	42
3.8.3	Efeito da Amostragem sobre a Área dos Extensômetros de Resistência	44
3.8.4	Diâmetro e Geometria do Furo	46
3.8.5	Propriedades Mecânicas do Material	47
<b>4.</b>	<b>Medição de Deslocamentos Radiais com Holografia</b>	<b>49</b>
4.1	Princípios da Holografia Eletrônica ESPI	50
4.1.1	As Franjas de Interferência	50
4.1.1.1	O Speckle	50
4.1.1.2	A Formação das Franjas	53
4.1.1.3	Dupla Iluminação e Sensibilidade	54
4.1.2	Processamento	57
4.1.2.1	O Método do Deslocamento de Fase	58
4.1.2.2	Quantificação do Deslocamento	59
4.2	O Interferômetro Radial	59
4.2.1	Princípio	60
4.2.2	Características	61
4.2.3	Fabricação dos Espelhos Cônicos	62
4.2.4	Aspectos Construtivos e Parâmetros de Projeto	63
4.2.5	Validação Experimental do Interferômetro	68
4.2.5.1	Montagem Experimental	68
4.2.5.2	Procedimento de Execução	69
4.2.5.3	Resultados e Conclusões	70
<b>5.</b>	<b>Desenvolvimento da Concepção do Módulo Aplicativo para Medição de Tensões Residuais (MATER)</b>	<b>72</b>
5.1	Características Desejáveis Manifestadas pelo Cliente	72
5.1.1	Grandeza a Medir	73
5.1.2	Aplicações Típicas	73
5.1.3	Resultados	73
5.1.4	Condições de Operação	74
5.1.5	Posição de Medição	74

5.1.6	Portabilidade	74
5.1.7	Condições de Acesso à Região de Medição	75
5.1.8	Tempo de Medição	75
5.1.9	Interface com Usuário	75
5.1.10	Suprimento Externo	75
5.1.11	Nível do Operador	76
5.2	<b>Cenário do MATER</b>	<b>76</b>
5.3	<b>Detalhamento das Funções e Princípios Construtivos Adotados</b>	<b>78</b>
5.3.1	Medir Tensões Residuais	78
5.3.2	Vender	80
5.4	<b>Princípios Construtivos Adotados</b>	<b>81</b>
6.	<b>Modelamento e Simulação da Concepção do MATER</b>	<b>86</b>
6.1	<b>Vibrações: sua Influência sobre as Medições com Holografia e Técnicas para Minimizar seus Efeitos</b>	<b>87</b>
6.2	<b>Simulação Numérica da Estabilidade</b>	<b>91</b>
6.3	<b>Aspectos Construtivos do Protótipo</b>	<b>97</b>
6.3.1	Estrutura Monobloco	97
6.3.2	Suporte da Câmera CCD	99
6.3.3	Placa Intermediária para Montagem de Elementos Auxiliares de Fixação	99
6.4	<b>Avaliação Experimental do Protótipo</b>	<b>101</b>
6.4.1	Objetivos	101
6.4.2	Infra-estrutura de Experimentação	101
6.4.2.1	Sistema de Simulação de Vibrações	102
6.4.2.2	Sistema de Medição de Vibrações	102
6.4.2.3	Estação Holográfica e Protótipo de Testes	102
6.4.3	Procedimento de Ensaio	104
6.4.3.1	Simulação de Diferentes Modos de Vibração e Avaliação da Estabilidade das Franjas	104
6.4.3.2	Simular choques mecânicos e avaliar as franjas	105
6.4.3.3	Avaliar rigidez dos componentes internos (movimentos relativos entre componentes)	105

6.4.4	Análise dos Resultados	106
6.4.4.1	Fixação Rígida à Peça Através de Parafusos	106
6.4.4.2	Fixação Rígida à Peça Através de Cola	108
6.4.4.3	Fixação Através de Sapatas Reguláveis e Cola	108
6.4.4.4	Fixação Através de Bases Magnéticas e Placa Intermediária	111
6.5	Conclusões	113
7.	<b>Protótipo de Tecnologia e Detalhamento de seus Subsistemas</b>	<b>114</b>
7.1	A Unidade Central de Controle e Processamento	115
7.2	O Cabeçote de Medição	115
7.2.1	Sistema de Fixação do MATER à Superfície da Peça a Medir	116
7.2.2	Sistema de Iluminação	120
7.2.2.1	Fonte de Luz	120
7.2.2.2	Transmissão da Luz da Unidade Central até o Cabeçote de Medição	122
7.2.2.3	Expansão e Colimação da Luz	122
7.2.2.4	Iluminação da Região de Medição	123
7.2.3	Sistema de Visualização	124
7.2.3.1	Câmera de Vídeo CCD	125
7.2.3.2	Subsistema de Visualização da Região de Medição Definida pelo Interferômetro Radial	126
7.2.3.3	Sistema de Visualização do Furo	130
7.2.4	Sistema de Proteção da Câmera	131
7.2.5	Sistema de Furação	133
7.2.5.1	Furadeiras e Ferramentas de Corte	133
7.2.5.2	Guia de Furação e Conjunto Micrométrico de Controle de Avanço	135
7.2.5.3	O Sistema de Furação - Vistas de Conjunto	135
7.2.6	Sistema de Deslocamento de Fase	139
7.2.6.1	Seleção do Transdutor Piezoelétrico	140
7.2.6.2	Acionamento e Controle do PZT	142
7.2.6.3	Algoritmos de Processamento	143
7.2.7	Estrutura Monobloco	145
7.2.8	O Sistema de Medição - Vistas de Conjunto	148
8.	<b>Resultados Finais, Conclusões Gerais e Recomendações</b>	<b>152</b>

**9. Referências Bibliográficas** 

---

 **174**

## RESUMO

Este trabalho contribui com propostas para o desenvolvimento de um sistema portátil para medir tensões residuais em ambiente industrial usando a holografia eletrônica (ESPI) e o clássico método do furo cego.

São apresentadas a busca e análise de informações junto a clientes potenciais, as principais barreiras tecnológicas, o conceito de um novo interferômetro, soluções para reduzir as dimensões e tornar mais prático e robusto um sistema de medição baseado na holografia, análise de erros, testes experimentais e, principalmente, o projeto e detalhes construtivos de um protótipo de sistema de medição (MATER).

A técnica empregada consiste em determinar o nível de tensões residuais (tensões principais e sua direção) através da medição interferométrica do campo radial de deslocamentos associado à introdução de um pequeno furo na peça ou estrutura analisada.

Utilizando técnicas de QFD e Função Síntese, o MATER foi dividido em vários subsistemas a serem integrados numa estrutura tipo monobloco. Os principais subsistemas e o protótipo do MATER são descritos em detalhe na dissertação.

*Palavras-chave:* [Holografia Eletrônica (ESPI)], [Análise Experimental de Tensões], [Óptica], [Projeto de Sistemas de Medição], [Mecânica de Precisão]



## ABSTRACT

This work contributes with proposals to the development of a portable system to measure residual stresses in an industrial environment using electronic holography (ESPI) and the classical blind-hole method. The measurement technique consists on determining residual stresses through the interferometric assessment of a radial displacement field associated to the introduction of a small hole into the part or structure under analysis.

Search for information nearby potential customers, identifying their needs and their translation into design requirements, main technological bounds, the concept of a new interferometer, solutions to reduce its physical dimensions and to make a measurement system based on electronic holography more robust and easier to use, errors analysis, experimental tests and, specially, the design and constructive details regarding a prototype of a measurement system (so-called MATER) are presented. Using techniques like Quality Function Deployment, MATER was divided into several subsystems to be integrated on a single-block structure. Main subsystems and Mater's prototype are described in detail.

*Keywords:* [Electronic Holography (ESPI)], [Experimental Stress Analysis], [Optics], [Design of Measurement Systems], [Precision Mechanics]

## **EINLEITUNG**

Die vorliegende Arbeit enthält Vorschläge zur Entwicklung eines portablen Messsystems für die Messung von Eigenspannungen unter Industrie-bedingungen. Das Messsystem kombiniert die Bohrlochmethode mit der elektronischen Auswertung von Speckle-Interferenzbildern (ESPI). Mittels einer kleinen Bohrung werden die Eigenspannungen an der Oberfläche der zu analysierenden Struktur "freigesetzt", d.h. die Oberfläche verformt sich in radialer Richtung um das Bohrloch. Durch die interferometrische Auswertung des gesamten radialen Deformationsfeldes können die Eigenspannungen (Hauptrichtungen und deren Orientierung) gemessen werden. Bohrer und Sensor(Interferometer) sind im Messkopf des Systems integriert.

Die Arbeit umfasst eine Informationsanalyse von potentiellen Kunden, wichtige technologische Probleme, das Prinzip eines neuen Interferometers, sowie Lösungen zu dessen Miniaturisierung und Verbesserung seiner Robustheit gegenüber harschen Umweltbedingungen. Die dabei erzielten Ergebnisse und gesammelten Erfahrungen sind in konstruktiven Details eines Prototypsensors und im Entwicklungsprojekt für ein integriertes Messsystem (MATER) zusammengefasst. Die metrologischen Eigenschaften des Messsystems werden durch eine umfangreiche Fehleranalyse sowie experimentelle Tests beschrieben.

*Schlagworte:* [Elektronische Holographie (ESPI)], [experimentelle Ermittlung von Eigenspannungen], [Konstruktion von Messgeräten], [Optik], [Feinmechanik]

RELAÇÃO DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS E VARIÁVEIS UTILIZADOS

$a$	amplitude de vibração	$\mu\text{m}$
$\bar{a}, \bar{b}$	coeficientes de correção para o método do furo	--
$\bar{A}_\epsilon, \bar{B}_\epsilon$	coeficientes de correção utilizados no cálculo das tensões principais pela extensometria	$\text{MPa}^{-1}$
$A_u, B_u$	coeficientes de correção utilizados no cálculo das tensões principais pela holografia	$\text{mm.MPa}^{-1}$
$\alpha$	ângulo do centro do sistema de coordenadas no experimento de validação do interferômetro radial	$^\circ$
$\alpha_{ps}$	ângulo de deslocamento de fase	$^\circ$
$\alpha_{radial}$	ângulo do interferômetro radial	$^\circ$
$\xi$	ângulo entre as direções do deslocamento e do vetor sensibilidade	$^\circ$
$\beta$	ângulo entre $\sigma_1$ e o eixo de referência	$^\circ$
CCD	Charge Coupled Device	--
$d_{(hkl)}$	espaçamento interplanar	nm
$d, \bar{d}$	deslocamento	mm
$d_{amostr}$	deslocamento amostrado	$\mu\text{m}$
$d1$	espaçamento integranular com a peça deformada uniformemente	nm
$d0$	espaçamento intergranular com a peça indeformada	nm
$D$	amplitude máxima de deslocamento	$\mu\text{m}$
$D_{foc}$	distância focal do interferômetro radial	mm
$D_{med}$	diâmetro da região iluminada pelo interferômetro radial	mm
$Dm_{espinf}$	diâmetro menor do espelho inferior do interferômetro radial	mm
$DM_{espsup}$	diâmetro maior do espelho superior do interferômetro radial	mm
$Do$	diâmetro do furo	mm
$D_{sombra}$	diâmetro da região de sombra	mm
$\delta_t$	ângulo de reflexão	$^\circ$
$\Delta a$	incerteza no ângulo do centro do sistema de coordenadas do experimento de validação do interferômetro radial	$^\circ$

$\Delta a_{ps}$	incerteza no ângulo de	
$\Delta \alpha_{radial}$	incerteza no ângulo do interferômetro radial	°
$\Delta \beta$	incerteza no ângulo das direções principais	°
$\Delta \phi$	alteração na diferença de fase entre dois feixes luminosos que interferem	°
$\Delta E$	incerteza no valor do módulo de elasticidade do material	MPa
$\Delta \varepsilon_i$	incerteza na deformação medida por extensometria	$\mu\text{m} / \text{m}$
$\Delta h$	incremento na profundidade	mm
$\Delta \nu$	incerteza no valor do coeficiente de Poisson do material	--
$\Delta \lambda$	incerteza no comprimento de onda do laser	nm
$\Delta_{esp}$	separação (gap) entre os espelhos cônicos	mm
$\Delta OF$	incerteza no n° de ordem de franja	--
$\Delta \psi$	alteração de fase devido ao deslocamento do objeto	°
$\Delta raio$	incerteza na medição do raio do furo	mm
$\Delta \sigma_1, \Delta \sigma_2$	incerteza no cálculo das tensões principais	MPa
$\Delta t$	intervalo de tempo	s, ms
$E$	módulo de elasticidade do material	MPa
$E_{esp}$	espessura dos espelhos cônicos	mm
$EQ$	erro quadrático	$\mu\text{m}^2$
$ESPI$	Electronic Speckle Pattern Interferometry	--
$ETE$	estado de tensões equivalente	--
$\varepsilon_{\phi, \psi}$	deformação da rede cristalina	$\mu\text{m}/\text{m}$
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	deformações medidas numa roseta de três elementos	$\mu\text{m} / \text{m}$
$\varepsilon_{radial}$	deformação radial aliviada	$\mu\text{m} / \text{m}$
$F$	abertura numérica ou F-number	--
$\varphi$	ângulo definido pela normal à superfície e o plano formado pelos feixes incidente e refratado	°
$\varphi$	ângulo de incidência do feixe	°
$h$	profundidade	mm
$h_i$	profundidade no i-ésimo incremento	mm
$H$	profundidade analisada	mm
$hkl$	índices de Müller para planos cristalinos	--
$I$	intensidade média do padrão de speckle	níveis de cinza

$I_i$	intensidade do feixe luminoso	níveis de cinza
$I_{int}$	intensidade do padrão de speckle resultante da interferência de dois feixes luminosos	níveis de cinza
$K$	constante	mm
$k_t$	fator de concentração de tensão	--
$\lambda$	comprimento de onda	nm
$m$	ampliação	--
$m_f$	valor correspondente ao número de voltas no arco trigonométrico de um ângulo de fase	--
$n$	nº inteiro correspondente à ordem de difração	--
$NF$	elevação do nível de fundo	mm
$n_i$	nº de imagens	--
$n_{med}$	nº de medidas efetuadas	--
$n_r$	nº de pontos experimentalmente medido	--
$\vec{n}$	vetor unitário	--
$\nu$	coeficiente de Poisson do material	--
$OF$	nº de ordem de franja	--
$\vec{p}$	vetor sensibilidade	--
$P(I)$	função densidade de probabilidade para padrão do speckle	níveis de cinza
$\psi$	ângulo entre a normal à superfície e o plano formado pelos eixos incidente e refratado	°
$R$	raio de amostragem	mm
$r$	razão $R/R_0$	--
$r_a$	raio de amostragem	mm
$R_{max}$	raio máximo de arredondamento medido na base do furo	mm
$R_0$	raio do furo	mm
$s$	desvio padrão experimental	
$S_0$	coeficiente de Fourier para frequência zero (termo constante)	--
$S_{2\theta}$	coeficiente de Fourier para segundo harmônico	--
$\sigma$	tensão média no plano	MPa
$\sigma_1, \sigma_2$	tensões principais	MPa
$\sigma_{1h}, \sigma_{2h}$	direções principais no modelo de distribuição variável de tensões ao longo da profundidade	MPa

$\sigma_{\phi}$	tensão no plano $\phi$	MPa
$\sigma_h$	tensão na profundidade	MPa
$\sigma_{hi}$	tensão na profundidade ao longo do i-ésimo incremento	MPa
$\sigma_{RS}$	tensão residual	MPa
$\sigma_{RSI}$	tensão residual de primeira espécie	MPa
$\sigma_{RSII}$	tensão residual de segunda espécie	MPa
$\sigma_{RSIII}$	tensão residual de terceira espécie	MPa
$t$	coeficiente $t$ de Student	--
$t_e$	tempo de exposição	ms
$T_o$	período do movimento oscilatório	ms
$T_s$	tamanho de speckle	$\mu\text{m}$
$\tau_{r,\theta}$	tensão cisalhante	MPa
$\theta$	ângulo definido por uma direção qualquer e o eixo de referência	°
$\theta$	ângulo de diferença de fase entre dois feixes	°
$\theta_e$	ângulo da excentricidade entre furo e centro da roseta	°
$\theta_i$	fase do feixe luminoso	°
$\theta_{(hkl)}$	ângulo de difração	°
$\overline{u}$	deslocamento médio de cadaanel de amostragem	comprimento
$U_r$	campo radial de deslocamentos ao longo do furo	comprimento
$U_{radial}$	campo radial de deslocamentos	comprimento
$X_1, X_2$	direções principais no modelo de distribuição variável de tensões ao longo da profundidade	°
$Z$	profundidade do furo	mm

## 1. Introdução

A influência deletéria de um estado de tensões residuais (atuando isoladamente ou superposto às tensões de serviço) pode levar à falhas prematuras ou inesperadas de componentes e estruturas mecânicas.

Contudo, tensões residuais podem gerar efeitos benéficos em estruturas sujeitas a um grande número de ciclos de trabalho. A resistência à fadiga de componentes submetidos a altos níveis de tensões cíclicas pode ser aumentada através da introdução de tensões residuais compressivas ao longo de sua superfície.

A determinação do estado de tensões residuais se constitui em uma ferramenta fundamental para preservação de estruturas (otimizando intervalos de manutenção e substituição de componentes) além de contribuir para a racionalização do processo de projeto, evitando os elevados coeficientes de segurança por vezes utilizados.

As técnicas experimentais de análise de tensões permitem alcançar resultados mais confiáveis e com maior rapidez quando comparadas aos métodos analíticos ou numéricos. Dentre as técnicas experimentais, o método do furo combinado com extensômetros de resistência configurados em roseta é o que tem tido maior aplicação prática, devido:

- ao conhecimento adquirido ao longo de muitos anos de pesquisa;
- ao procedimento de ensaio ser normalizado e relativamente simples;
- à fácil interpretação dos resultados.

Contudo, a rapidez do ensaio e a confiabilidade dos resultados são, de certa forma, limitados por alguns fatores:

- o tempo despendido na preparação da superfície da peça e colagem dos extensômetros;
- a necessidade de grande precisão de centragem entre o furo e o conjunto de extensômetros;
- a amostragem discreta e em poucos pontos.

A demanda por um novo sistema, rápido e confiável, para medição de tensões

residuais em campo; o desafio tecnológico que se apresenta e o propósito de desenvolver, difundir e diversificar a aplicação da holografia eletrônica como técnica de medição através do projeto “Módulos Aplicativos Industriais para o Sistema Estação Holográfica”, financiado pelo PADCT, Universidade Federal de Santa Catarina, Fundação CERTI, Petrobrás (Cenpes), Embraco, Metal Leve e Copei, motivaram a realização desta pesquisa.

Esta dissertação apresenta estudos de viabilidade de aplicação da holografia eletrônica à medição de tensões residuais, resultados experimentais e o protótipo de sistema de medição que combina a holografia, o conceito de um interferômetro com sensibilidade radial e o clássico método do furo.

O trabalho se inicia através de um resumo sobre tensões residuais, sua natureza, definições e principais técnicas de medição.

O terceiro capítulo destaca o conceito do método do furo e sua formulação matemática. Uma comparação entre as técnicas para medição de tensões baseadas na extensometria e na holografia combinada com um interferômetro com sensibilidade radial é feita. Este estudo tem como objetivo uma análise preliminar sobre a viabilidade do uso da holografia eletrônica em relação ao método clássico da extensometria. Um programa de simulação foi desenvolvido para avaliar o comportamento metrológico da holografia combinada com o interferômetro proposto neste trabalho. A extensometria foi avaliada utilizando algoritmos já consagrados na literatura científica e adicionando o efeito da integração da deformação sobre a área ativa dos extensômetros.

Definições referentes à formulação matemática e princípios da holografia eletrônica, além do conceito de um novo interferômetro de espelhos cônicos com sensibilidade radial são apresentados no quarto capítulo. Detalhes sobre um experimento para qualificação do interferômetro proposto também são mostrados.

O projeto básico do sistema de medição (MATER), constando o levantamento das necessidades dos clientes e sua tradução em requisitos de projeto, os aspectos técnicos e as diferentes soluções adotadas são discutidos no quinto capítulo.

O sexto capítulo destaca a avaliação do interferômetro radial e seu conjunto de componentes ópticos quando submetido à vibrações e choques mecânicos. Os primeiros estudos foram feitos através de simulação, levando à identificação dos parâmetros críticos do sistema e constatando a necessidade de uma estrutura rígida



unindo os componentes ópticos. Um primeiro protótipo foi então construído para avaliar experimentalmente a influência de vibrações e diferentes formas de fixação do sistema de medição à superfície da peça a medir. Os resultados experimentais foram animadores, confirmando os estudos teóricos e mostrando ser possível construir um sistema de medição robusto, capaz de operar adequadamente mesmo em condições ambientais adversas no que se refere à aplicações típicas da holografia eletrônica.

O sétimo capítulo apresenta uma descrição detalhada de todo o sistema de medição, através da identificação dos diversos subsistemas e seus componentes.

As conclusões gerais sobre o trabalho desenvolvido, considerando os objetivos iniciais e os resultados alcançados, além de sugestões para o aperfeiçoamento do projeto são mostrados no oitavo capítulo.

Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas citadas ao longo do texto e os anexos que complementam alguns tópicos deste trabalho.

## **2. Tensões Residuais**

### **2.1 Definição**

Tensões residuais<sup>[1,2]</sup> são definidas como sendo um estado de tensões internas autoequilibradas que existem em um corpo livre de forças e momentos externos ao longo de sua superfície de contorno. Em condições de equilíbrio, o somatório destas tensões sobre o volume do corpo deve ser nulo, bem como, sobre qualquer plano que passe pelo corpo.

Tensões residuais ocorrem normalmente nos materiais metálicos policristalinos e se originam quando, nos processos de fabricação, determinada parte do material, como consequência de processos mecânicos, térmicos ou químicos, tem sua forma ou volume alterados. Surgem regiões permanentemente restringidas enclausuradas por partes inalteradas. Em todos os casos, o nível de tensões introduzido depende de características físicas, químicas e mecânicas dos materiais, geometria do componente, dos processos de fabricação, montagem ou instalação e tratamentos térmicos sofridos.

Tensões residuais se superpõem às tensões normais de carregamento e aceleram os processos de corrosão e fadiga. Contudo, podem gerar efeitos benéficos em peças sujeitas a um grande número de ciclos de trabalho. A resistência à fadiga de componentes submetidos a altos níveis de tensões cíclicas pode ser aumentada através da introdução de tensões residuais compressivas ao longo de sua superfície.

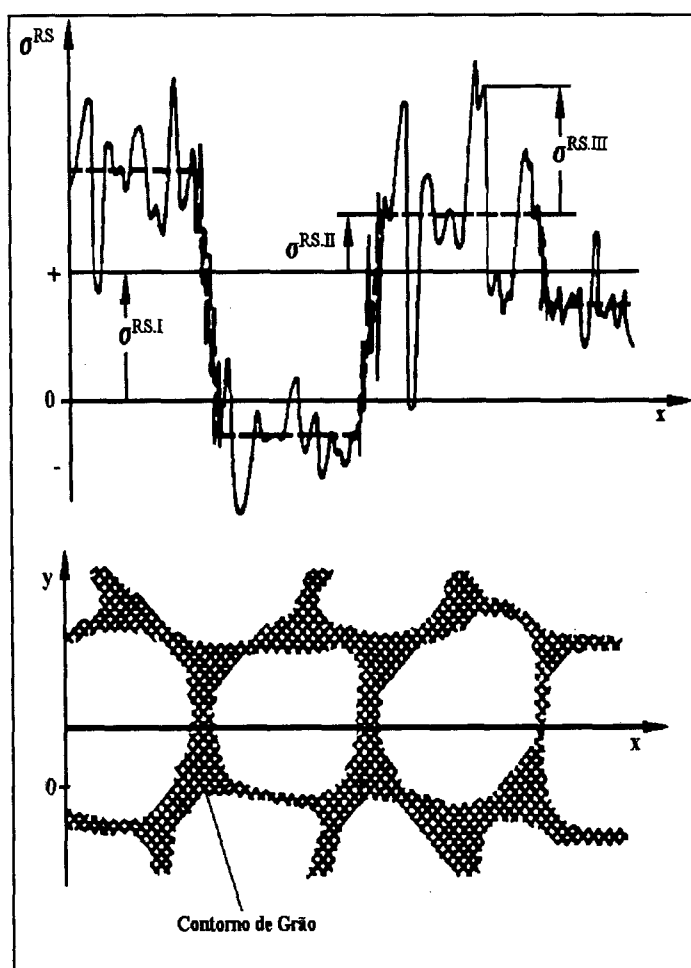
### **2.2 Classificação**

Tensões residuais podem ser classificadas, quanto à sua distribuição ao longo da microestrutura do material, em tensões de 1ª, 2ª ou 3ª espécies.

Tensões de 1ª espécie distribuem-se de maneira quase homogênea sobre vários grãos do material e estão em equilíbrio sobre todo o seu volume. Qualquer alteração neste equilíbrio de forças e momentos ao longo de um volume que contém tensões de 1ª espécie provoca alterações macroscópicas nas dimensões do corpo. A Figura 2.1 mostra a distribuição das tensões ao longo da microestrutura do material.

Tensões residuais de 2ª espécie são aproximadamente homogêneas sobre áreas microscópicas, seja apenas um grão ou parte de um grão. As forças e momentos internos relativos a este tipo de tensão se equilibram somente sobre um pequeno número de grãos. Havendo alteração deste equilíbrio, podem ou não ocorrer alterações macroscópicas nas dimensões do corpo.

Tensões residuais de 3ª espécie são heterogeneamente distribuídas ao longo de áreas submicroscópicas do material, da ordem de algumas distâncias interatômicas. Estão em equilíbrio considerando pequenas partes de um grão. Não ocorrem alterações macroscópicas nas dimensões do material caso a condição de equilíbrio seja alterada.



*Figura 2.1 - Classificação das tensões residuais quanto à sua distribuição ao longo da microestrutura do material*

Esta classificação, tal como apresentada, subdivide tensões residuais em macroscópicas e microscópicas. Tensões residuais macroscópicas são definidas como sendo de 1ª espécie. A combinação de tensões residuais de 2ª e 3ª espécies define as tensões microscópicas.

Em materiais metálicos não existe a rigor um estado livre de tensão residual. Tecnicamente é desejado um estado livre de tensão de 1ª espécie, uma vez que, dada sua abrangência em termos de microestrutura, é o tipo de tensão que realmente gera os problemas e efeitos conhecidos quando se discute tensões residuais. O valor máximo que podem atingir é o limite de escoamento do material. As tensões residuais dentro dos grãos podem ser muito maiores que as tensões residuais macroscópicas, sem contudo, comprometer o material.

### **2.3 Métodos para Avaliação e Medição de Tensões Residuais**

Os métodos numéricos e experimentais hoje disponíveis permitem determinar com boa segurança os valores limites de carregamento estático aos quais uma peça pode ser submetida. Por outro lado, avaliar o estado de tensões que atua numa peça (superposição das tensões de carregamento com tensões residuais) é uma tarefa bastante difícil. Métodos baratos, simples e confiáveis para determinação de tensões residuais ainda não existem, embora muitos princípios e técnicas já tenham sido desenvolvidos ao longo dos anos.

A princípio, a maneira mais cômoda de se determinar o nível de tensões residuais de uma peça é através de modelos analíticos ou numéricos<sup>[3]</sup>. A maior dificuldade na aplicação de modelos teóricos consiste na necessidade de que sejam bem conhecidas as causas (processos mecânicos e metalúrgicos) que geraram aquele estado de tensões que se deseja determinar, ou seja, a história do material desde a sua fabricação.

Para a construção de modelos analíticos geralmente se admite um estado plano de tensões e um comportamento elasto-plástico perfeito para o material. Desta forma, a aplicação de modelos analíticos fica restrita a formas geométricas e carregamentos muito simples.

Os métodos numéricos<sup>[4]</sup> (elementos finitos, diferenças finitas, elementos de contorno, etc.) assumem um comportamento tridimensional elasto-plástico e possibilitam o modelamento de formas geométricas mais complexas e de carregamentos mecânicos e térmicos, assim como estáticos e dinâmicos. No entanto, conforme a geometria, o carregamento, tipo de modelamento ou discretização, os resultados podem ser muito diferentes. Até o presente momento, os maiores avanços têm acontecido nos campos da soldagem, forjamento e tratamentos térmicos. A formulação de modelos matemáticos para descrever tais processos envolve uma série de parâmetros que devem ser bem definidos: comportamento termomecânico do material, efeitos externos ao qual o material é submetido e influência de efeitos térmicos e mecânicos nas transformações estruturais do material . Por exemplo, a descrição quantitativa de tensões residuais surgidas no processo de soldagem requer a consideração de parâmetros de projeto da estrutura, modelamento dos gradientes de temperatura, dependência das propriedades mecânicas do material com a temperatura, transformações de fase, formulação de um critério arbitrário de escoamento, etc.

Apesar dos recentes avanços nas técnicas numéricas, o estado de tensões de uma peça pode ser determinado através de técnicas experimentais com maior confiabilidade e rapidez, independente de se conhecer os processos de fabricação e tratamentos térmicos envolvidos.

A análise híbrida<sup>[5]</sup>, combinando resultados experimentais com métodos numéricos, começa a assumir grande importância no cenário da análise de tensões.

A Tabela 2.1 mostra, de forma resumida, uma comparação entre os principais métodos para determinação de tensões residuais.

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS			
	Analíticos	Numéricos	Experimentais
Complexidade do Problema	aplicável a problemas simples	qualquer	qualquer
Geometria da Peça	simples	qualquer	qualquer

<b>MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS</b> (continuação)			
	<b>Analíticos</b>	<b>Numéricos</b>	<b>Experimentais</b>
Aplicabilidade	muito baixa	restrita	alta
Origem do Campo de Tensões	simples	qualquer	qualquer
História de Carregamentos	exige conhecimento	exige conhecimento	não exige conhecimento
Tipo de Formulação	elasto perfeitamente plástico e estado plano de tensões	elasto-plástico e possibilidade de modelamento sólido	estado plano e, em alguns casos, estado triaxial de tensões
Resultados Obtidos	2D ou 3D	3D	maioria 2D e raramente 3D
Confiabilidade no Resultado	boa para problemas simples	fortemente dependente da formulação do problema	alta, dependendo da escolha da técnica apropriada
Tempo Envolvido	pouco, considerando a formulação do problema	alto (vários dias até meses)	pouco (horas), porém há técnicas que podem demandar dias

*Tabela 2.1- Comparação entre os métodos para determinação de tensões residuais*

### **2.3.1 Principais Técnicas Experimentais para Medição de Tensões Residuais**

Segundo sua natureza, tensões residuais podem ser determinadas experimentalmente a partir de:

- seus efeitos sobre propriedades físicas do material, sendo a base das técnicas acústicas (ultrassom) e eletromagnéticas (ruído Barkhausen e correntes parasitas<sup>[6]</sup>).
- medição do espaçamento interatômico do material, princípio utilizado na

medição através de difração de raios X e raios de nêutrons.

- deformações ou deslocamentos macroscópicos que surgem a partir do alívio de tensões quando parte do material é removida, princípio básico dos métodos mecânicos.

Atualmente os métodos mais utilizados na análise experimental são os mecânicos usando extensômetros de resistência e a difração de Raios X.

### **2.3.1.1 Difração de Raios X e Difração de Nêutrons**

O método de difração consiste em determinar o espaçamento interplanar dos cristais que compõem o material, utilizando feixes de raios X<sup>[7, 8, 9]</sup> ou raios de nêutrons<sup>[10, 11]</sup>. A diferença entre os dois métodos está na maior profundidade que se consegue alcançar com raios de nêutrons, uma vez que devido ao seu menor comprimento de onda, penetram mais profundamente no material. A grandeza medida é a posição angular da linha de difração para um determinado plano do cristal. Conhecida a posição da linha de difração para um cristal livre de tensões residuais, é possível calcular a deformação na rede cristalina da peça e utilizá-la para calcular o campo de tensões residuais. A distância interatômica da rede cristalina é empregada como uma medida padrão que se modifica com o estado de tensão do material.

O princípio de medição de tensões residuais por difração de raios X está baseado na lei de Bragg, dada pela seguinte equação:

$$n\lambda = 2d_{(hkl)} \sin\theta_{(hkl)} \quad (2.1)$$

onde:

$n$  é um número inteiro correspondente à ordem de difração

$\lambda$  é o comprimento de onda do raio X

$d_{(hkl)}$  é o espaçamento interplanar medido em relação à normal  $(hkl)$

$\theta_{(hkl)}$  é o ângulo de difração medido em relação à normal

$(hkl)$  são os índices de Müller dos planos cristalinos.

Uma vez que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é fixo, a variação de  $d_{(hkl)}$  provoca o deslocamento do ângulo de difração, o qual é utilizado para determinar a deformação da rede cristalina. A relação entre tensão e deformação é dada por:

$$\varepsilon_{\phi,\psi} = \left( \frac{1+\nu}{E} \right) \sigma_{\phi} \sin^2 \Psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.2)$$

onde:

$\varepsilon_{\phi,\psi}$  é a deformação da rede cristalina

$\nu$  é o coeficiente de Poisson do material

$E$  é o módulo de elasticidade

$\sigma_{\phi}$  é a tensão no plano de direção  $\phi$

$\psi$  é o ângulo dado pela normal à superfície e o plano formado pelos feixes incidente e refratado

$\sigma_1, \sigma_2$  são as tensões principais no plano.

Tipicamente, o método de difração de raios X é empregado para determinação de tensões superficiais, alcançando alguns micrometros de profundidade. Quando utilizado em conjunto com a técnica da decapagem química podem ser analisadas profundidades maiores (em torno de 0,1 mm) e também determinados gradientes de tensões ao longo da profundidade. A área da superfície amostrada depende do diâmetro do feixe de raios X, variando de 1 a 8 mm.

Os raios de nêutrons apresentam uma profundidade de penetração da ordem de alguns poucos centímetros.

Os equipamentos para medição<sup>[12, 13]</sup>, chamados de difractômetros, são de alto custo e requerem extremo cuidado na operação. Consistem de uma fonte (de raios X ou nêutrons) e sensores (filmes ou câmeras) para determinação do ângulo  $\theta$  e sua variação com diferentes orientações  $\psi$ .

Raios X têm sido utilizados numa série de aplicações industriais, incluindo determinação de tensões residuais geradas em diversos processos de fabricação (tratamentos térmicos, cementação, shot peening, usinagem...). Contudo, sua utilização exige pessoal especializado, tanto na operação como na preparação da superfície da peça e análise dos resultados.



Uma característica inerente à medição de deformações interplanares (espaçamento interatômico) é a superposição do efeito das tensões residuais de 1ª e 2ª espécies que atuam no volume analisado, fato que pode gerar problemas de interpretação.

A incerteza dos métodos de difração é fortemente afetada por parâmetros metalúrgicos como tamanho de grão, impurezas, vazios e discordâncias. Depende ainda da profundidade de penetração, anisotropia e texturização do material. Os resultados são corretos quando os cristais possuem um comportamento linear elástico, quando o material é policristalino, homogêneo e isotrópico e quando as tensões são constantes sobre a área irradiada. A incerteza atribuída ao método é da ordem de  $\pm 20$  a  $\pm 35$  MPa. A Figura 2.2 mostra o princípio da técnica de medição de tensões por difração.

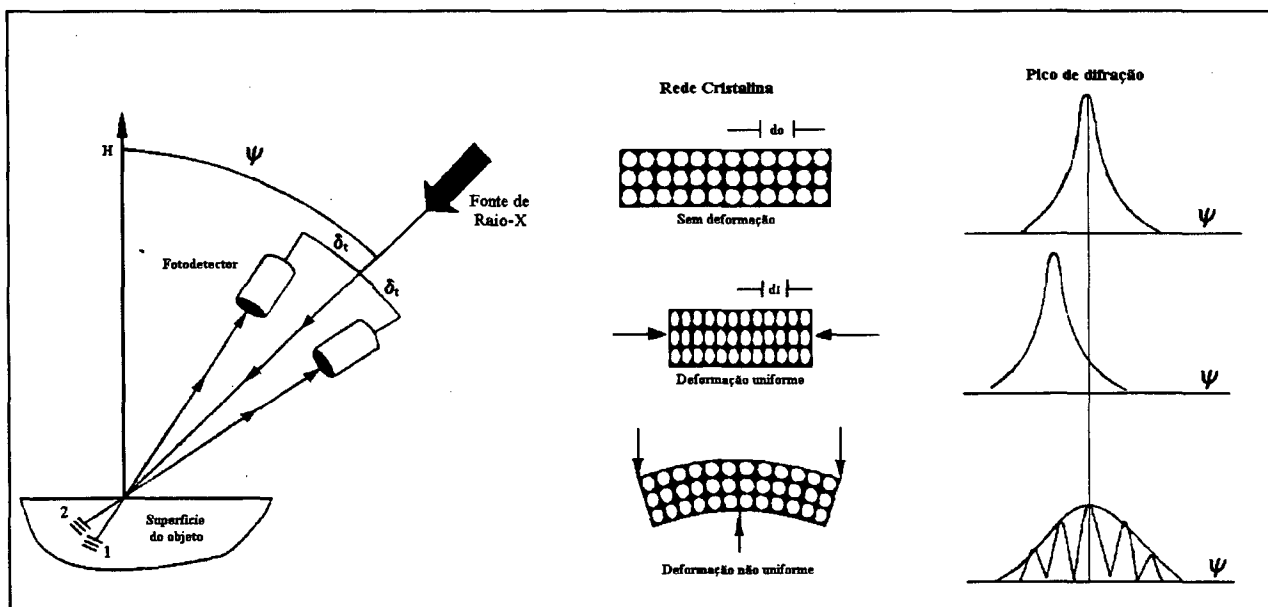


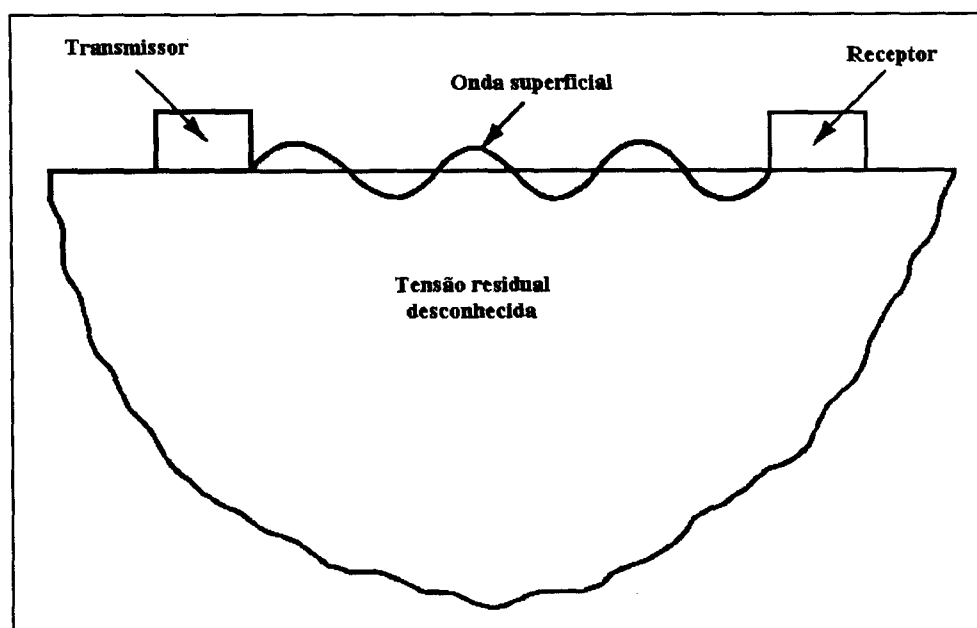
Figura 2.2 - Esquema da técnica de medição de tensões através de difração

### 2.3.1.2 Técnicas Acústicas (Ultrassom)

A análise de tensões a partir de ondas ultrassônicas<sup>[14, 15]</sup> está baseada na

relação entre sua velocidade de propagação e as constantes elásticas de ordens superiores do material, as quais dependem do estado de tensões da peça. O método consiste em introduzir ondas longitudinais, transversais ou de Rayleigh no material que está sendo analisado e medir as alterações na velocidade de propagação destas ondas em função da tensão. Ondas de Rayleigh são produzidas por refração quando ondas longitudinais penetram no material segundo um ângulo de incidência adequado, dado pela lei de Snell. A profundidade de penetração é dependente do comprimento de onda, de forma que gradientes de tensão ao longo da profundidade podem ser medidos alterando a frequência da onda incidente. A amplitude das ondas decresce exponencialmente com a profundidade, caindo quase a zero para espessuras da ordem de  $1 \frac{1}{2}$  comprimentos de onda.

A determinação de tensões utilizando ultrassom é feita a partir de dois transdutores (transmissor e receptor) instalados na superfície da peça, conforme mostra a Figura 2.3. Os transdutores são normalmente constituídos de cristais piezoelétricos que produzem ondas mecânicas longitudinais quando eletricamente excitados.. A velocidade de propagação é determinada medindo-se o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção da onda.



*Figura 2.3- Medição de tensões através de ondas ultrassônicas*

Alguns problemas na implementação deste método são: dificuldades no acoplamento dos transdutores à peça; a necessidade de se transmitir ondas com características apropriadas, bem determinadas e com propriedades constantes no componente que está sendo analisado; medir com incertezas adequadas pequenas alterações na velocidade de propagação introduzidas pelo estado de tensão e distinguir os efeitos de alteração de velocidade devido à tensão daqueles associados à microestrutura do material. É necessário que se faça uma calibração para cada material a ser testado, determinando a relação entre o estado de tensões e a alteração na velocidade de propagação.

#### **2.3.1.3 Técnicas Eletromagnéticas (Análise do Ruído Barkhausen e Correntes Parasitas)**

O princípio dos equipamentos que utilizam o método Barkhausen<sup>[7, 16]</sup> consiste em medir a amplitude do ruído acústico provocado pela magnetização local de materiais ferromagnéticos. Informações complementares importantes sobre o estado de tensões e microestrutura podem ser obtidas através da análise do ruído magnético e da permeabilidade magnética incremental. Dada a dificuldade em medir estas duas grandezas, em aplicações práticas, utiliza-se somente o ruído acústico.

A magnetização local provoca o rearranjo dos dipolos magnéticos do material, que se agrupam em regiões hipoteticamente delimitadas por paredes<sup>1</sup>. Este rearranjo magnético acontece de forma que, na medida em que o material assume uma determinada magnetização, pequenas regiões se unem formando regiões maiores e de mesma orientação magnética. Este crescimento se dá de forma incremental e repentina, gerando o ruído.

O método é utilizado na medição de tensões superficiais, apresentando uma penetração máxima de 1 mm. A profundidade de penetração depende da frequência (comprimento de onda) utilizada.

O aparato empregado é simples, sendo constituído por uma unidade central e

---

<sup>1</sup> Denominadas de paredes de Bloch.

um cabeçote móvel. O cabeçote é responsável pela magnetização, captação do ruído gerado e pelo volume de material amostrado.

A sensibilidade à microestrutura exige padrões de calibração com estado de tensões bem conhecido (normalmente zero). A utilização do método está restrito à indicações qualitativas, apresentando elevada incerteza em termos quantitativos.

Recentemente Chern<sup>[6]</sup> apresentou uma técnica para medição de tensões residuais baseada na introdução de correntes parasitas na peça em análise. A distribuição e amplitude das correntes que se formam é função das propriedades eletromagnéticas do material e do estado de tensões. O sistema foi patenteado pela NASA em 1993.

#### **2.3.1.4 Métodos Mecânicos**

Os métodos mecânicos podem ser empregados na medição de tensões residuais junto à superfície de peças até profundidades de 250 mm. O fato de estarem sendo utilizados há muitos anos e, por este motivo, atingido um maior grau de desenvolvimento, faz com que suas limitações e aplicações sejam mais claramente definidas, do que em métodos concorrentes. A sua maior desvantagem é que, pela sua natureza, são métodos destrutivos, embora o grau de dano estrutural possa ser insignificante em muitos casos.

A essência dos métodos mecânicos está no fato de que, em se modificando a geometria de uma estrutura, a distribuição de tensões residuais no seu interior também é alterada. Esta mudança no estado de tensões origina um campo de deformações que pode ser medido através de extensômetros de resistência ou qualquer outro meio capaz de quantificar tal grandeza. A princípio, se a mudança na geometria for bem determinada e o campo de deformações medido com incertezas apropriadas, o estado de tensões pode sempre ser calculado. Entretanto, devido à complexidade que os cálculos assumem quando utilizadas formas geométricas genéricas, todos os métodos mecânicos acabam recorrendo à alterações simples e bem definidas de geometria.

Dentre os mecânicos, podem ser destacados o método do seccionamento<sup>[17, 18]</sup>, da trepanação<sup>[19, 20]</sup>, da remoção de camadas, “compliance”<sup>[21, 22]</sup> e, especialmente, os

métodos baseados na execução de um pequeno furo<sup>[23, 24, 25]</sup>.

Estes últimos consistem em medir a deformação associada ao alívio de tensões gerado pela introdução de um furo de pequenas dimensões (diâmetro e profundidade) no material que está sendo analisado. Embora haja remoção de material, o método normalmente não traz prejuízo estrutural, uma vez que o furo (1 a 2 mm de diâmetro) é proporcionalmente muito pequeno quando comparado às dimensões do componente. O procedimento de ensaio é padronizado através da norma ASTM E837<sup>[26]</sup>. A técnica tem sido desenvolvida há várias décadas e se encontra bastante difundida internacionalmente. A instrumentação básica para a execução de um ensaio consiste de uma ponte amplificadora, roseta extensométrica de três elementos e de um sistema para centragem e execução do furo.

A aplicabilidade do método do furo é restrita à medição de macro tensões. O método é aplicável a qualquer tipo de material, desde que o furo possa ser usinado. A técnica possui a limitação de medir apenas estado plano de tensões, pois a tensão ao longo da profundidade na direção perpendicular à superfície não pode ser medida. A incerteza associada às propriedades mecânicas do material e parâmetros associados ao furo como tensões residuais introduzidas na sua usinagem, geometria irregular, descentragem em relação ao centro da roseta são importantes fontes de erros. A incerteza do método está entre  $\pm 20$  e  $\pm 30$  MPa e pode ser reduzida através de calibração experimental, embora os modelos desenvolvidos através de técnicas numéricas permitam alcançar resultados confiáveis.

### 3. O Método do Furo

A técnica semi-destrutiva para determinação de tensões residuais através da execução de um pequeno furo<sup>2</sup> e medição das deformações associadas a este alívio mecânico de tensões, foi apresentado pela primeira vez em 1934 por Mathar<sup>[23]</sup>. O modelo apresentado fundamentava-se na solução de Kirsch<sup>[27]</sup> para placas infinitas. Aplicações industriais baseadas neste método tomaram impulso a partir do trabalho de Soete e Vancrombrugge<sup>[24]</sup>, que sugeriram a substituição dos extensômetros mecânicos por extensômetros de resistência elétrica. Outro salto importante na popularização da técnica se deu com o trabalho de Rendler e Vigness<sup>[25]</sup>, a partir do qual era eliminada a necessidade de calibrações individuais para cada ensaio. A criação de modelos baseados em técnicas de elementos finitos<sup>[28]</sup>, introduzindo coeficientes de calibração pouco dependentes do material, tem direcionado a técnica neste final de século.

A aplicação do método é direcionada à medição de tensões residuais constantes ao longo da profundidade, embora alguns autores o tenham utilizado para avaliar tensões não uniformes. A confiabilidade do método depende fortemente da técnica utilizada na quantificação das deformações, de parâmetros geométricos (cilindricidade, diâmetro e profundidade do furo), propriedades mecânicas do material e do próprio estado de tensões que se deseja medir.

O método do furo combinado com o uso de extensômetros de resistência<sup>[26, 29, 30]</sup> se constitui na técnica mais difundida para medição de tensões residuais, tanto em laboratório como em aplicações no campo. Outras técnicas como revestimentos quebradiços<sup>[31]</sup> e fotoelasticidade<sup>[31]</sup> são utilizadas para monitorar o campo de deformações gerado. Técnicas ópticas utilizando Moiré<sup>[31]</sup> e holografia eletrônica têm sido empregadas com sucesso em laboratório, embora ainda apresentem problemas<sup>3</sup> para aplicação em campo.

---

<sup>2</sup> O diâmetro do furo varia entre 0,5 e 3,5 mm. Normalmente são usinados com diâmetros de 0,8, 1,6 e 3,2 mm.

<sup>3</sup> A sensibilidade a fatores ambientais e a complexidade das montagens têm limitado o emprego de técnicas ópticas em campo.

### 3.1 Formulação Matemática

Em geral assume-se um estado plano de tensões, placa infinita<sup>4</sup> em relação ao diâmetro do furo, material isotrópico, homogêneo e dentro do regime elástico, além do conhecimento do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material analisado. A literatura também apresenta modelos para materiais ortotrópicos<sup>32</sup> e diferentes distribuições de tensão<sup>[33, 34]</sup>.

Através da solução de Kirsch<sup>[27]</sup> e do princípio da superposição foram desenvolvidas soluções analíticas “exatas” para campos de tensão uniaxial e biaxial em placas finas e infinitas com furo passante e tensão constante ao longo da profundidade. Desta forma, utilizando as relações constitutivas da elasticidade linear, é possível calcular as tensões principais e sua orientação a partir dos deslocamentos ou deformações medidas.

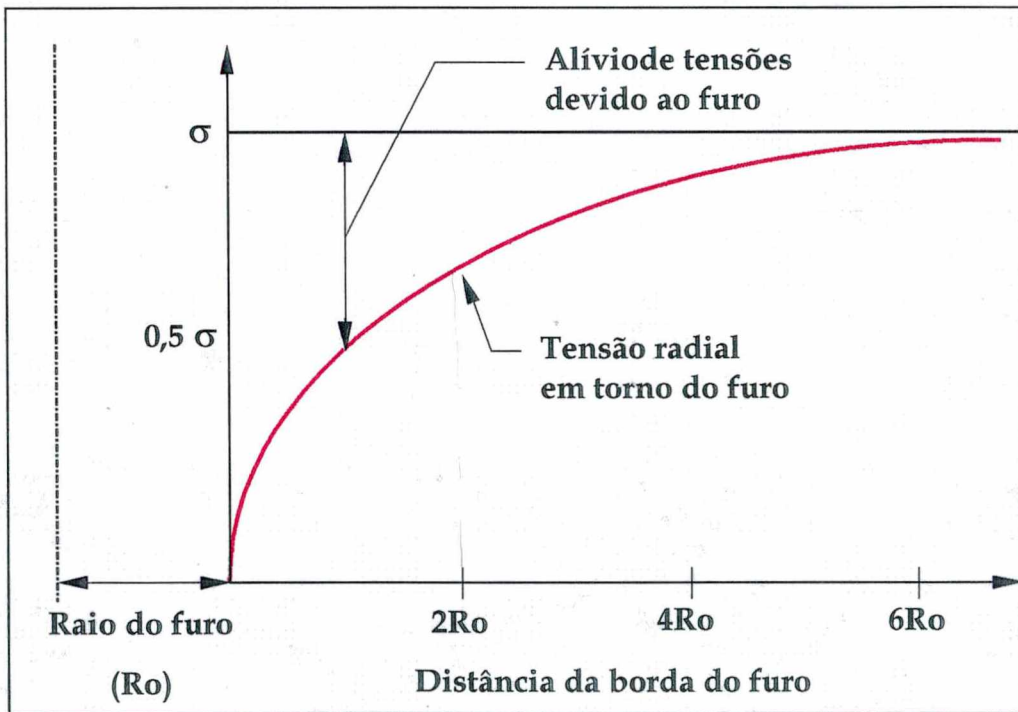


Figura 3.1 - Alívio de tensões pelo método do furo<sup>5</sup>

<sup>4</sup> A norma ASTM E837-92 recomenda que as dimensões mínimas da peça em teste obedeçam uma relação com o diâmetro do furo de 10 vezes na largura e no comprimento e 5 vezes na espessura.

<sup>5</sup> Distribuição de tensões considerando uma placa infinita de material isotrópico dentro do regime elástico e submetido a um estado uniaxial de tensões.

A Figura 3.1 mostra como a introdução de um pequeno furo modifica localmente a distribuição de tensões numa peça.

O campo radial<sup>6</sup> de deformações gerado pela introdução de um furo passante em uma peça submetida a um estado biaxial de tensões é dado por:

$$\varepsilon_{radial}(R, \theta) = \frac{-(1+\nu)}{2E} \left\{ \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{r^2} \right) - \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{r^2} \right) \left[ \frac{3}{r^2} - \frac{4}{(1+\nu)} \right] \cos(2\theta - 2\beta) \right\} \quad (3.1)$$

onde:

$\varepsilon_{radial}$  : deformação radial aliviada

$\nu, E$  : coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade do material

$\sigma_1, \sigma_2$  : tensões principais

$r$  : constante dada pela razão entre o raio de amostragem ( $R$ ) e o raio do furo ( $R_o$ )

$\theta$  : ângulo entre uma direção qualquer e o eixo de referência

$\beta$  : ângulo entre a direção principal de  $\sigma_1$  e o eixo de referência

A equação 3.1 pode ser reescrita como :

$$\varepsilon_{radial}(R, \theta) = +A_\varepsilon(r)(\sigma_1 + \sigma_2) + B_\varepsilon(r)(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (3.2)$$

sendo que:

$$A_\varepsilon(r) = \frac{-(1+\nu)}{2E} \frac{1}{r^2} \quad (3.3)$$

$$B_\varepsilon(r) = \frac{-(1+\nu)}{2E} \frac{1}{r^2} \left[ \frac{4}{(1+\nu)} - \frac{3}{r^2} \right] \quad (3.4)$$

O campo radial de deslocamentos, obtido integrando-se a equação 3.1 em relação ao raio de amostragem, é dado por:

---

<sup>6</sup> O alívio de tensões causado pelo furo gera deformações (deslocamentos) nas direções radial e tangencial. Contudo, a deformação radial é consideravelmente maior do que a tangencial, de forma que as rosetas comercialmente disponíveis têm os filamentos dispostos radialmente.



$$u_{radial}(r, \theta) = -R_o \frac{(1+\nu)}{2E} \left\{ -\frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{r} + (\sigma_1 - \sigma_2) \left[ \frac{1}{r^3} - \frac{4}{(1+\nu)r} \right] \right\} \cos(2\theta - 2\beta) \quad (3.5)$$

A equação 3.5 pode ser reescrita como:

$$u_{radial}(R, \theta) = A_u(R)(\sigma_1 + \sigma_2) + B_u(R)(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (3.6)$$

onde:

$$A_u(R) = \frac{1+\nu}{2E} R \left( \frac{R_o}{R} \right)^2 \quad (3.7)$$

$$B_u(R) = -\frac{1+\nu}{2E} R \left[ \left( \frac{R_o}{R} \right)^4 - \frac{4}{1+\nu} \left( \frac{R_o}{R} \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

Através da análise das equações 3.1 e 3.5 observa-se que, à medida em que se afasta da borda do furo, a deformação e o deslocamento radial diminuem. Assim, quanto mais próximo da borda do furo estas grandezas forem medidas maior será a amplitude do sinal obtido. Por outro lado, nesta situação aumenta a influência de fatores indesejados como rebarbas e deformações plásticas.

### 3.2 Formulação do Furo Cego

Em aplicações práticas dificilmente as considerações adotadas na formulação analítica exata podem ser satisfeitas. A condição de furo passante é a primeira que normalmente não é respeitada.

À medida em que a profundidade do furo aumenta, as tensões aliviadas se aproximam do valor que corresponde à condição de furo passante. O alívio de tensões obtido a partir de profundidades entre 1 a 1,2<sup>7</sup> vezes o diâmetro do furo é mínimo. A forma da função que descreve a deformação em termos da profundidade do furo

---

<sup>7</sup> A norma ASTM E837-92 sugere a relação de 1,2.

depende da razão entre o raio de amostragem<sup>8</sup> e o raio do furo.

A geometria do furo cego é suficientemente complexa de forma que não existe solução exata baseada na teoria da elasticidade que permita calcular diretamente o nível de tensões residuais, exceto pela introdução dos coeficientes de correção  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  determinados experimentalmente ou através de modelamento numérico.

Comparado à formulação do furo passante, a análise do furo cego exige a introdução de uma nova variável adimensional independente, relacionando a profundidade ( $Z$ ) do furo com o seu diâmetro ( $D_o$ ).

Coefficientes  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  obtidos experimentalmente têm sua validade restrita àquelas condições utilizadas na calibração: uniformidade do estado de tensões, furos com mesmo diâmetro e profundidade, material com mesmas propriedades elásticas e, no caso de rosetas, igual geometria.

Uma importante contribuição do trabalho de Rendler e Vigness foi a demonstração de que para um certo tipo de material, determinado pelas suas propriedades mecânicas  $E$  e  $\nu$ , os coeficientes de correção  $\bar{a}$  e  $\bar{b}$  são simples funções geométricas e, por isso, constantes para casos geometricamente semelhantes. Isto significa que, uma vez que estes coeficientes tenham sido determinados para uma configuração particular de roseta, esta pode ter suas dimensões modificadas e os coeficientes continuarão os mesmos, desde que a relação entre a profundidade e o diâmetro do furo seja alterada da mesma proporção.

Muitos trabalhos têm sido publicados no sentido de eliminar a dependência dos coeficientes  $A$  e  $B$  com o tipo de material, restando somente a dependência geométrica. O trabalhos de Schajer<sup>[28]</sup> e Nelson, Fuchs e Makino<sup>[35]</sup> apresentam coeficientes de correção para medição de deformações e deslocamentos respectivamente. Os fator de correção  $\bar{a}$  é independente do coeficiente de Poisson do material, enquanto que o fator  $\bar{b}$  é ligeiramente dependente<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> Entende-se por raio de amostragem como sendo a distância em relação ao centro do furo em que as deformações (deslocamentos) são medidas. Na medição com extensômetros corresponde à metade do diâmetro nominal da roseta.

<sup>9</sup> A norma ASTM E837 fornece uma tabela onde o erro do fator  $\bar{b}$  é inferior a 1% para variações do coeficiente de Poisson entre 0,28 e 0,33.

Os coeficientes  $A$  e  $B$ <sup>10</sup> corrigidos são determinados, respectivamente, por:

$$\bar{A} = -\frac{1+\nu}{2E} \bar{a} \quad (3.9)$$

$$\bar{B} = -\frac{1}{2E} \bar{b} \quad (3.10)$$

onde:

$\bar{A}$  e  $\bar{B}$  são os coeficientes  $A(r)$  e  $B(r)$  corrigidos

A equação 3.1 é então reescrita como:

$$\varepsilon_{radial} = +\bar{A}_\varepsilon(\sigma_1 + \sigma_2) + \bar{B}_\varepsilon(\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\theta - 2\beta) \quad (3.11)$$

A equação 3.5 pode ser reescrita como:

$$u_{radial} = \bar{A}_u(\sigma_1 + \sigma_2) + \bar{B}_u(\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\theta - 2\beta) \quad (3.12)$$

### 3.3 Tensões Residuais Variáveis ao Longo da Profundidade

A formulação clássica do método do furo considera a existência de tensões uniformes ao longo da profundidade, conforme representado na Figura 3.2. Nos casos em que esta condição não é satisfeita, a tensão calculada sempre será menor do que a tensão máxima. A furação incremental, que permite plotar a curva de deformação X profundidade, torna possível avaliar a uniformidade do campo de tensões.

A norma ASTM E-837 limita a aplicação do método do furo à distribuições uniformes de tensões ao longo da profundidade. Porém, Kelsey<sup>[36]</sup>, Niku-Lari et al.<sup>[37]</sup> e outros<sup>[38]</sup> apresentam modelos matemáticos que combinados com a furação incremental permitem quantificar tensões variáveis na profundidade. A confiabilidade

---

<sup>10</sup> Aqui se está tratando com coeficientes genéricos. Deve-se tomar o cuidado de usar os coeficientes  $A$ ,  $a$ ,  $B$  e  $b$  com subíndices  $\varepsilon$  ou  $u$ , conforme se esteja trabalhando com deformações ou deslocamentos, respectivamente.

destes modelos depende , além da própria formulação matemática, das técnicas de medição e furação utilizadas.

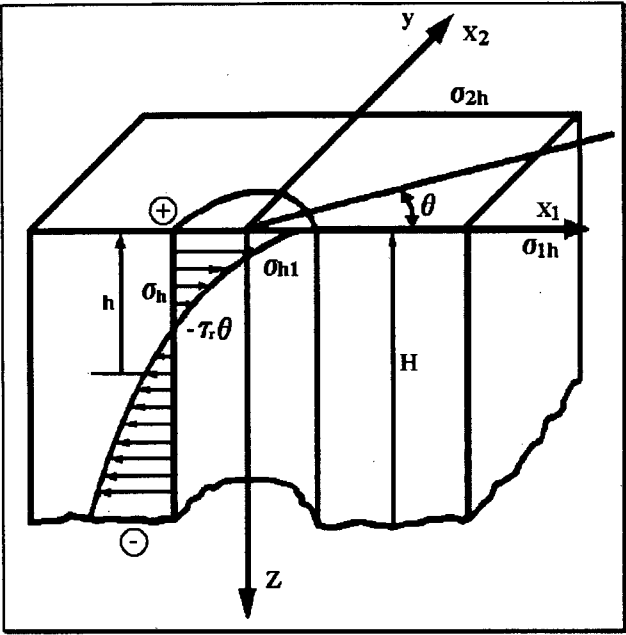


Figura 3.2- Distribuição verdadeira de tensões residuais ao longo da profundidade

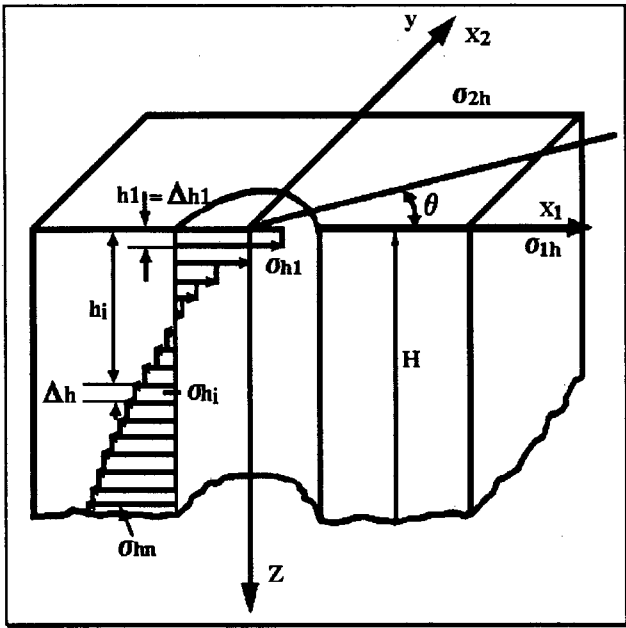


Figura 3.3- Distribuição de tensões residuais assumida pelo modelo teórico

Os modelos formulados geralmente assumem as seguintes condições: o material é isotrópico e está no regime elástico; as tensões medidas estão abaixo do limite elástico do material<sup>11</sup>; a componente de tensão normal à superfície é desprezível; dentro de cada camada de material que é removida as tensões são constantes (usa-se o valor médio) e as forças de cisalhamento são nulas entre camadas adjacentes. A Figura 3.3 mostra a distribuição variável de tensões considerada por alguns modelos.

### **3.4 O Processo de Furação**

A escolha do processo de furação deve considerar a geometria do furo obtido, o controle da profundidade e a não introdução de novas tensões residuais. A formulação do furo tal como apresentada por Kirsch considera um furo perfeitamente cilíndrico, perpendicular à superfície e passante através da espessura do material.

Para que os modelos de cálculo possam ser aplicados com segurança, é necessário que a geometria do furo seja bem determinada. A questão do furo não ser passante é compensada pela introdução de coeficientes de correção. O furo obtido deve ter fundo plano, obedecer às tolerâncias de cilindricidade e perpendicularismo e ter sua profundidade e diâmetros bem conhecidos. A compensação matemática de furos que não seguem os requisitos de geometria é possível. Contudo, a identificação de desvios geométricos requer a destruição da peça.

O controle da profundidade do furo é muito importante quando utilizado o método da furação incremental. Pequenos erros no valor da profundidade, principalmente naqueles incrementos mais próximos à superfície, podem levar a erros inaceitáveis no cálculo das tensões.

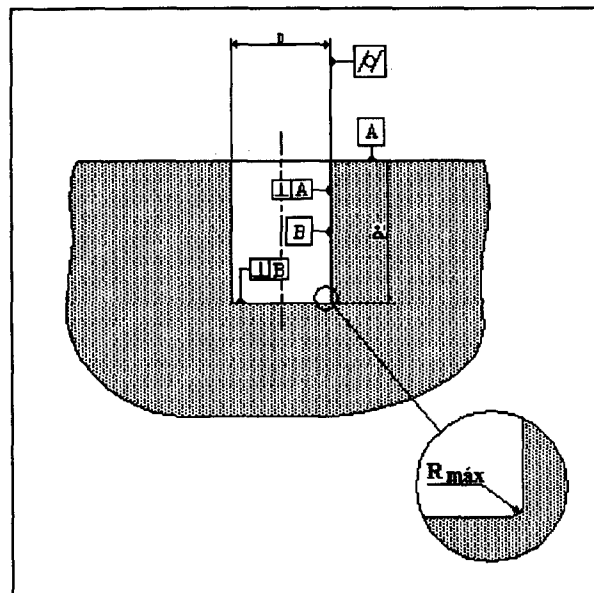
O processo de execução do furo pode introduzir novas tensões residuais<sup>[39, 40]</sup> e em alguns casos tensões não uniformes ao longo da profundidade do furo. Para alguns materiais<sup>12</sup> o nível de tensão introduzido pode inclusive superar o estado de

---

<sup>11</sup> De acordo com o raio de amostragem, a geometria do furo e o estado de tensões, as tensões medidas não devem ser superiores ao intervalo entre 33 e 80% da tensão de escoamento do material.

<sup>12</sup> Materiais de elevada dureza como o aço inoxidável e materiais muito dúcteis como alumínio e cobre.

tensões residuais inicial.



*Figura 3.4 - Principais características geométricas que devem ser observadas no furo*

Ao longo dos anos foram pesquisadas várias técnicas de furação: eletroerosão, corte a laser, usinagem através de jato de partículas abrasivas, usinagem eletroquímica e usinagem utilizando brocas ou fresas especiais.

Máquinas de eletroerosão não são indicadas devido a não portabilidade do equipamento e à introdução de tensões residuais elevadas.

Lasers são muito caros e igualmente difíceis de serem levados a campo.

O uso de jato de partículas abrasivas é uma técnica que teve grande aceitação a partir de meados da década de 70 em função do trabalho de Bush e Komer<sup>[41]</sup>. O nível de tensões introduzido é muito pequeno. Contudo, a qualidade e a repetibilidade da geometria do furo obtido são problemas que limitam a confiabilidade dos resultados obtidos quando utilizada esta técnica de furação. Normalmente a forma do furo varia com a profundidade.

A usinagem utilizando ferramentas convencionais ou especiais sempre foi bastante utilizada devido à facilidade em se obter um furo com boa qualidade geométrica. Contudo, o nível de tensões residuais introduzido pode ser elevado,

motivo pelo qual a usinagem à baixa rotação é desaconselhada. Flaman<sup>[42]</sup> conduziu uma pesquisa<sup>13</sup> onde foram comparados os métodos de usinagem em baixa rotação utilizando fresas convencionais com a usinagem em altíssima rotação (300.000 a 400.000 rpm). Os resultados obtidos indicam que a segunda técnica de usinagem é mais adequada, seja sob o aspecto da qualidade geométrica como pelo menor nível de tensões introduzido.

O método da usinagem eletroquímica apresenta um grande atrativo: a não introdução de novas tensões. Contudo, o equipamento necessário, a pouca repetitividade e a qualidade geométrica dos furos limitam sua utilização. Esta técnica tem sido muito pesquisada, apresentando boas possibilidades de utilização no futuro.

### 3.5 Fontes de Erros

As principais fontes de erros associadas ao método do furo estão relacionadas a:

- não uniformidade do estado de tensões que se deseja medir;
- relação entre as dimensões do furo e as dimensões da peça;
- processo de furação;
- diâmetro e geometria do furo;
- incertezas nas deformações/deslocamentos medidos;
- propriedades do material.

A formulação do método do furo supõe um estado de tensões uniforme. Contudo, processos de fabricação como a soldagem introduzem gradientes de tensão ao longo da superfície. Gradientes de tensão ao longo da profundidade também não são raros<sup>14</sup>. Quando o estado de tensões aparentemente varia com a profundidade, as

---

<sup>13</sup> Os ensaios foram executados em aço carbono, aço inoxidável, níquel, alumínio e cobre.

<sup>14</sup> Muito cuidado deve ser tomado na preparação da superfície de medição. Operações de retificação ou abrasão mecânica (esmerilhamento, jateamento, etc) podem introduzir elevados níveis de tensões residuais.

tensões assim calculadas não representam seu valor verdadeiro. Na realidade, se está determinado um estado de tensões equivalente (ETE) que produziria as deformações medidas naquela profundidade. O estado de tensões equivalente determinado para o primeiro incremento é o melhor indicativo das tensões reais naquela camada. Do segundo incremento em diante, a avaliação quantitativa das tensões a partir do ETE passa a ser cada vez mais difícil. Isto se deve ao fato de que as deformações medidas em incrementos subseqüentes são devidas não só às tensões existentes naquela camada mas também às tensões nas camadas superiores. A contribuição relativa das tensões das camadas próximas à superfície é muito mais significativa do que a das camadas mais profundas. Considerando estes fatores, interpretações quantitativas podem somente ser feitas com segurança para incrementos onde a relação profundidade/diâmetro do furo não seja superior a 0,2.

De forma geral, pode-se dizer que o método é mais indicado para quantificação de tensões residuais uniformes com a profundidade. Para este caso, os coeficientes de correção são bem determinados e as incertezas das tensões calculadas são pequenas - admitindo-se que não ocorram erros experimentais significativos. A furação incremental também pode ser utilizada na avaliação da uniformidade do estado de tensões e também para a quantificação de tensões variáveis ao longo da profundidade. Nestes últimos casos são necessários coeficientes de correção determinados através de elementos finitos. A incerteza no cálculo de tensões variáveis aumenta.

A utilização da furação incremental combinada com modelamento através de técnicas numéricas permite<sup>15</sup>, dentro de certas restrições, determinar tensões variáveis ao longo da profundidade. No entanto, autores como Procter e Beaney<sup>[43]</sup> afirmam que o emprego da furação incremental não tem sido necessária na maioria das aplicações práticas. A partir dos trabalhos publicados por Kelsey<sup>[44]</sup> e Bathgate<sup>[45]</sup> é possível mostrar que, assumindo uma distribuição linear de tensão variando de uma tensão máxima na superfície e caindo a zero junto à profundidade final do furo<sup>16</sup>, a tensão calculada ainda corresponde a 80% da tensão máxima.

---

<sup>15</sup> Observar item 3.3.

<sup>16</sup> Um gradiente de tensão tão severo e dificilmente ocorre na prática.



Outro fator a se considerar é que o furo executado na superfície da peça atua como um elemento de concentração de tensões. Para um estado de cisalhamento puro, o fator de concentração de tensão ( $k_t$ ) é 4; para tensão uniaxial, o fator de concentração de tensão é de 3. Num estado equi-biaxial ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ),  $k_t = 2$ . Isto significa que se a tensão exceder  $1/3$  da tensão de escoamento do material no caso uniaxial ou  $1/2$  da tensão de escoamento no caso equi-biaxial, haverá alguma plastificação nas bordas do furo. O nível de plastificação depende da curva tensão x deformação característica do material.

No caso da tensão uniaxial, por exemplo, os erros podem ser desprezados <sup>17</sup> para um nível de tensão igual a metade da tensão de escoamento. Os erros sobem para 10% quando a tensão aplicada atinge a tensão de escoamento. A Figura 3.5 mostra a influência da plastificação ao redor do furo considerando diferentes estados de tensão.

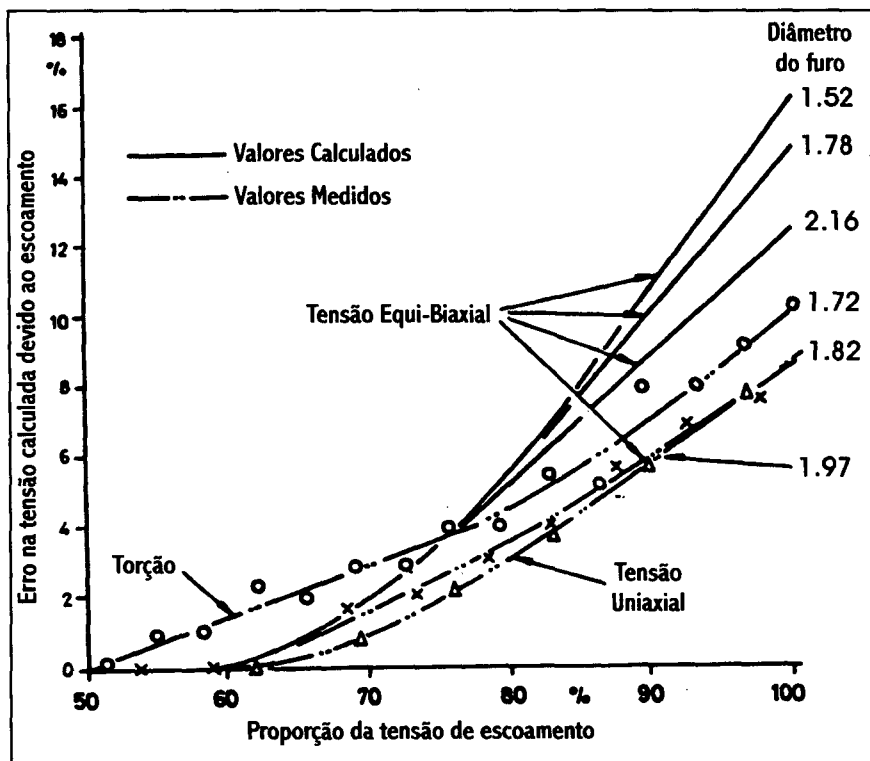


Figura 3.5 - Efeito da plastificação ao redor do furo

<sup>17</sup> Para amostragem não muito próxima às bordas do furo. Raios de amostragem de 2 vezes o raio do furo são suficientes para evitar a influência da região plastificada.

A formulação inicial do método considera a execução de um furo passante e de diâmetro muito pequeno quando comparado à largura e ao comprimento da peça onde o ensaio será executado. A condição de furo passante normalmente não é satisfeita, de forma que devem ser empregados os coeficientes de correção para furo cego citados anteriormente.

O processo de furação empregado é crítico sob dois aspectos: o nível de tensões introduzido e a qualidade geométrica do furo obtido. A literatura indica que a usinagem em altíssima rotação tem apresentado os melhores resultados considerando estes dois fatores.

É importante que o diâmetro do furo seja medido após a usinagem, uma vez que, normalmente o diâmetro efetivo da ferramenta difere do diâmetro nominal, além do efeito de folgas radiais na furadeira.

Além do diâmetro, a geometria (cilindricidade e efeitos de arredondamento das bordas junto à base do furo) também é um parâmetro importante para garantir resultados confiáveis.

As propriedades mecânicas do material (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) afetam os resultados obtidos. Incertezas típicas nas propriedades mecânicas de aços e ligas de alumínio variam entre 1 e 3%. Este nível de incerteza pode ser considerado pequeno frente aos que decorrem quando não se seguem as considerações básicas da teoria.

### **3.6 Método do Furo e Extensometria<sup>18</sup>**

A praticidade e a abrangência de aplicação tornou a extensometria a técnica mais difundida na medição de tensões residuais, tanto em laboratório como na indústria. O procedimento de ensaio é padronizado pela norma ASTM E837<sup>[26]</sup> e bem aceito internacionalmente. O processamento e a quantificação dos resultados é simples.

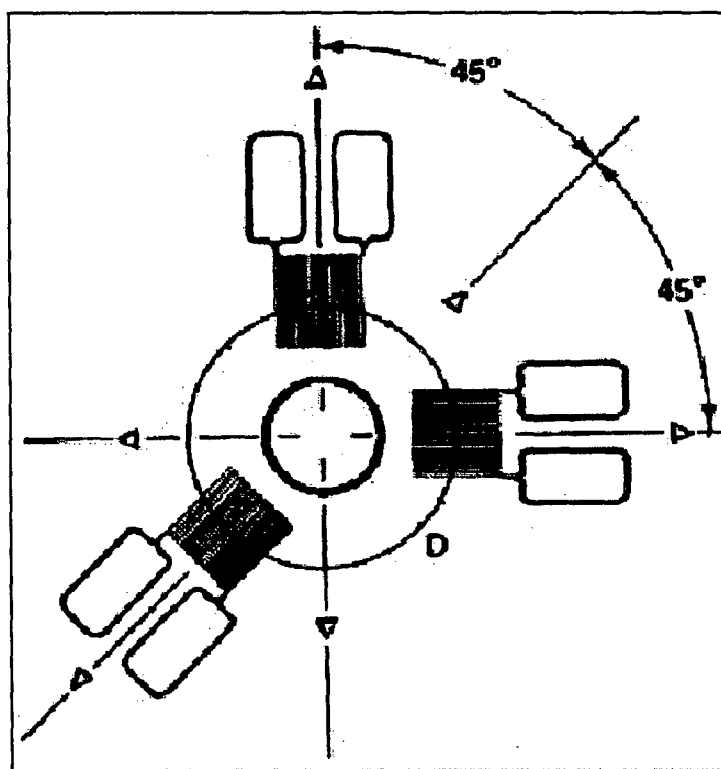
A medição das deformações geradas pelo alívio de tensões é feita através de

---

<sup>18</sup> As recomendações apresentadas neste item seguem a norma ASTM E837-92.

uma roseta extensométrica de três elementos com sensibilidade radial. Comercialmente são encontrados dois tipos básicos de rosetas: um para uso geral e outro específico para medição próxima a obstáculos.

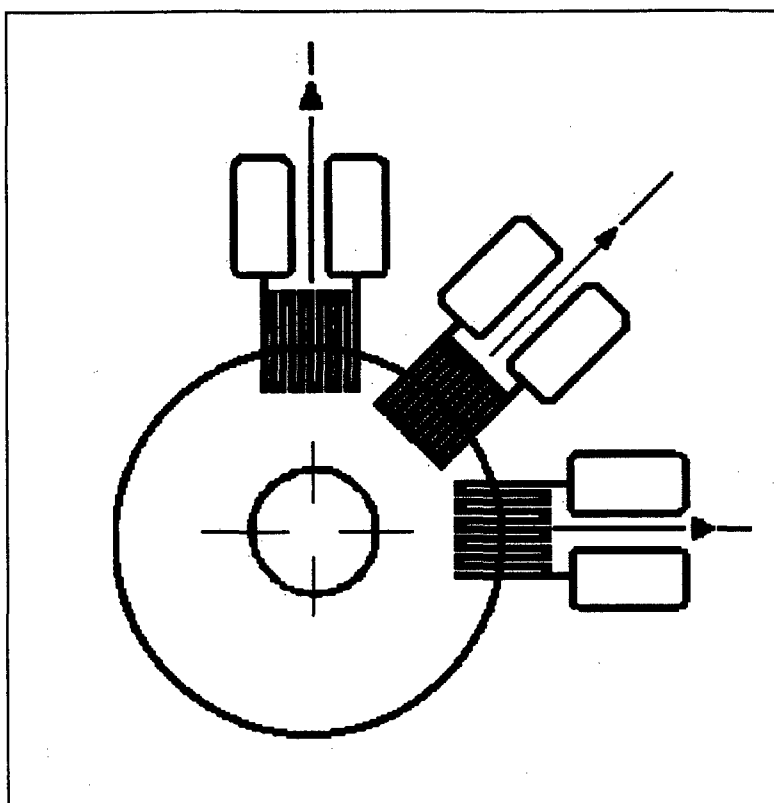
A primeira consiste de um conjunto de três extensômetros orientados radialmente e eqüidistantes do centro da roseta, dois deles perpendiculares entre si e o terceiro a 45° (Figura 3.6).



*Figura 3.6 - Rosetas de uso geral*

O segundo tipo se diferencia do anterior apenas pela distribuição dos extensômetros, agora dispostos muito próximos entre si, ocupando todos um único quadrante (Figura 3.7). Esta configuração permite que o furo seja executado junto a pontos de solda ou outras irregularidades<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> O usuário deve estar consciente de que a execução do furo próximo a obstáculos (superfícies livres, descontinuidades, alterações geométricas abruptas) contrariam a condição de placa infinita.



*Figura 3.7 - Rosetas próprias para obstáculos*

A instalação das rosetas requer uma superfície limpa e lisa. O processo de preparação da superfície deve ser feito com bastante cuidado no sentido de evitar a introdução de tensões residuais. Operações de retificação ou desgaste por esmeril devem ser evitadas.

O comprimento e a largura da área ativa da roseta preferencialmente não devem exceder o diâmetro do furo executado. A instrumentação para leitura das deformações deve ter uma estabilidade e repetibilidade de no máximo  $\pm 2 \mu\epsilon$ <sup>20</sup>. O comprimento dos cabos de ligação deve ser o menor possível e um circuito para compensação de temperatura deve ser empregado.

O diâmetro do furo executado deve manter com o diâmetro efetivo da roseta uma relação que varia entre 2,5 a 3,4. À medida em que esta relação aumenta, diminui a sensibilidade do método<sup>21</sup>. A profundidade final do furo deve ser de 1,2 vezes o seu

<sup>20</sup> A deformação de  $1\mu\epsilon$  equivale à  $1 \times 10^{-6} \mu\text{m/m}$ .

<sup>21</sup> Quanto mais afastado da borda do furo menor é o alívio de tensões.

diâmetro. A excentricidade máxima recomendada entre o furo e o centro da roseta é de  $\pm 0,015$  vezes o diâmetro do furo.

### 3.6.1 Procedimento de Ensaio

Depois de preparada a superfície da peça, são colados os extensômetros e seus terminais conectados à ponte amplificadora. O dispositivo de furação é centrado em relação à roseta e colado à peça. Antes de iniciar o processo de furação deve-se verificar se as leituras obtidas para cada extensômetro indicam deformação zero. Através da fricção de uma pequena borracha sobre a área ativa dos extensômetros é possível verificar se existem falhas na colagem. Caso algum dos extensômetros apresente problemas, a roseta deve ser substituída. Superfícies rugosas ou com resíduos de óxidos, gordura ou outras impurezas dificultam a colagem da roseta.

O furo deve preferencialmente ser executado em passos<sup>22</sup>; cada incremento correspondendo a no máximo 10% da profundidade final do furo. A cada incremento devem ser adquiridas as deformações referentes aos três extensômetros. A partir dos dados obtidos, é determinada a curva de deformação<sup>23</sup> para cada extensômetro e determinado o estado de tensões da peça.

### 3.6.2 Quantificação dos Resultados

Assumindo um estado de tensões uniforme ao longo da profundidade, as tensões principais são calculadas através da equação:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A_\varepsilon} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B_\varepsilon} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (3.13)$$

<sup>22</sup> A execução do furo em passos é recomendada pela norma ASTM E837. Porém, segundo Procter e Beaney, a furação Incremental não é necessária.

<sup>23</sup> Conforme Figura 3.1.

onde:

$\sigma_1, \sigma_2$  : são as tensões principais

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  : deformações referentes aos extensômetros 1, 2 e 3

$\overline{A_\varepsilon}, \overline{B_\varepsilon}$  : coeficientes corrigidos, considerando a formulação de furo passante ou cego

### 3.6.3 Fontes de Erros e Limitações

As principais fontes de erros<sup>[46]</sup> do método do furo com rosetas extensométricas, decorrentes da técnica de medição são:

- não concentricidade do furo em relação ao centro da roseta;
- amostragem de pequeno número de pontos;
- tensões residuais introduzidas na preparação da superfície onde serão colados os extensômetros;
- erros na medição das deformações devido a problemas na preparação da superfície e colagem dos extensômetros, influência dos fios de ligação, instrumentação inadequada, efeito da sensibilidade transversal dos extensômetros<sup>[47, 48]</sup>;
- o efeito da amostragem sobre a toda área do extensômetro (integração do campo de deslocamentos ao longo da área ativa do extensômetro);
- estado de tensão existente na peça analisada difere daquele considerado na formulação matemática do modelo.

Muitos destes erros podem ser evitados e alguns corrigidos através de algoritmos matemáticos. Contudo limitações como o tempo de preparação<sup>24</sup> e colagem, custo das rosetas e as dimensões mínimas dos extensômetros ainda não podem ser solucionadas e continuarão sendo potenciais fontes de erros.

A montagem de extensômetros de resistência requer limpeza e preparação especiais da superfície em que serão colados. A colagem e soldagem dos fios de

---

<sup>24</sup> O tempo de preparação, incluindo o alinhamento do sistema de furação, varia entre uma e duas horas para cada ponto de medição.

conexão também são operações que exigem cuidado e experiência do operador. A principal fonte de erros na instalação das rosetas está na colagem. Não existe nenhuma forma segura de avaliar efetivamente se os extensômetros foram bem colados, ou seja, não há como garantir que a deformação indicada pelo extensômetro seja a mesma sofrida pelo material. Embora não tão críticos como a colagem, os cabos de ligação e flutuações térmicas também influenciam o resultado da medição.

As dimensões dos extensômetros de resistência impossibilitam a medição localizada. Este tipo de medição é limitado fisicamente pela posição e dimensão das grades dos extensômetros. O primeiro fator faz com que sejam necessários furos de maior diâmetro, normalmente entre 1,6 e 3,2 mm. Furos com 0,8 mm de diâmetro podem não gerar deformação suficiente, diminuindo sobremaneira a relação entre as amplitudes do sinal e do ruído e, conseqüentemente, aumentando a incerteza da medição. As dimensões das grades fazem com que o valor medido não represente a deformação num único ponto, mas uma deformação média, resultado da integração do campo de deformações ao longo da área ativa do extensômetro. Embora existam rosetas com extensômetros bastante pequenos, sua utilização normalmente está associada a uma maior incerteza no resultado da medição.

### **3.7 Método do Furo e Holografia**

Técnicas ópticas<sup>[49, 50, 51, 52, 53]</sup> têm sido empregadas com sucesso na medição de tensões residuais. Contudo, problemas como montagens experimentais complexas, envolvendo um grande número de componentes ópticos, dificuldades na quantificação dos resultados e a sensibilidade a fatores ambientais<sup>25</sup> ainda limitam sua utilização, especialmente fora do laboratório.

A combinação da holografia eletrônica e um interferômetro com sensibilidade radial permite medir o campo de deslocamentos radiais gerado pela introdução do furo. O desenvolvimento deste interferômetro, montado em um sistema rígido e compacto facilita o processamento dos resultados, e diminui o número de

---

<sup>25</sup> Vibrações mecânicas, variações rápidas de temperatura e flutuações do índice de refração do meio em que se faz o ensaio.

componentes e as suas dimensões .

A principal diferença da técnica de holografia, com relação à extensometria, está na grandeza física e no sinal a serem medidos. Na extensometria são medidas deformações através de pequenas variações de tensão decorrentes do desequilíbrio de um sistema de resistores configurados em ponte de Wheatstone. Na holografia, o campo de deslocamentos é medido através de alterações no ângulo de fase da interferência de feixes de luz monocromática .

### 3.7.1 Quantificação dos Resultados

O valor e o ângulo das tensões principais pode ser quantificado através da análise harmônica dos dados obtidos a partir de um anel de amostragem circular fechado. Este anel, que pode ser selecionado a qualquer distância da borda do furo, é caracterizado por um determinado número de pontos de mesmo raio e incremento angular uniforme.

Os deslocamentos radiais medidos ao longo do anel de amostragem caracterizam uma função periódica. Pela análise da equação 3.5, mantido constante o raio, o campo de deslocamentos possui uma componente com frequência  $2f$ , dada por  $\cos(2\theta+2\beta)$  e outro termo constante.

A equação 3.6 pode ser rescrita como:

$$U_r(r, \theta) = A_u(r)(\sigma_1 + \sigma_2) + B_u(r)(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) \quad (3.14)$$

onde:

$$A_u(r) = \frac{1+\nu}{2E} r \left( \frac{R_o}{r} \right)^2 \quad (3.15)$$

$$B_u(r) = \frac{-1+2\nu}{2E} r \left[ \left( \frac{R_o}{r} \right)^4 - \frac{4}{1+\nu} \left( \frac{R_o}{r} \right)^2 \right] \quad (3.16)$$

Os coeficientes  $A_u(r)$  e  $B_u(r)$  devem ser substituídos por  $\bar{A}_u(r)$  e  $\bar{B}_u(r)$  <sup>[35]</sup>, conforme a formulação de furo cego ou passante.



Os coeficientes da série de Fourier que melhor se ajustam aos deslocamentos medidos no anel de amostragem podem ser utilizados para determinar  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\beta$  por:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{S_o}{A(r_a)} + \frac{S_{2\theta}}{B(r_a)} \right) \quad (3.17)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{S_o}{A(r_a)} - \frac{S_{2\theta}}{B(r_a)} \right) \quad (3.18)$$

onde:

$S_o$  representa o coeficiente de Fourier para frequência zero (termo constante)

$S_{2\theta}$  representa o coeficiente de Fourier para frequência  $2\theta$

$r_a$  é o raio de amostragem selecionado

O ângulo das tensões principais é determinado a partir da razão entre os termos em seno e cosseno do segundo harmônico da série de Fourier.

Teoricamente, dados obtidos a partir de diferentes raios de amostragem devem levar aos mesmos resultados de tensões residuais. Esta propriedade permite detectar efeitos como plastificação localizada ou fortes gradientes de tensão ao longo da superfície da peça.

Há situações práticas em que não é possível efetuar a amostragem dos deslocamentos em torno de um anel completo porque uma parte do mapa de fases está comprometida. Neste casos, não é possível determinar as tensões residuais pela análise dos harmônicos e o método dos mínimos quadrados pode ser usado como alternativa. Esta solução consiste em comparar um conjunto de deslocamentos radiais medidos experimentalmente com a equação 3.5. Os valores de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\beta$  são ajustados de forma a minimizar o erro quadrático entre os pontos experimentais e os valores calculados pela equação 3.14. Como consequência a influência de erros aleatórios é significativamente reduzida.

O erro quadrático entre a equação 3.14 e os dados experimentais é calculado por:

$$EQ = \sum_{i=1}^{np} \{ U_r(r_i, \theta_i) + A(r_i)(\sigma_1 + \sigma_2) - B(r_i)(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta_i - 2\beta_i) \}^2 \quad (3.19)$$

onde:

$EQ$  é o erro quadrático

$n_p$  é o número de pontos experimentalmente medidos

$U_r(r_i, \theta_i)$  representa o valor do deslocamento radial medido para cada ponto

Os valores de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\beta$  que minimizam a equação 3.19 são obtidos derivando EQ em relação a cada um destes parâmetros e resolvendo o sistema não linear resultante quando cada uma destas equações é igualada a zero.

Coeficientes de correção<sup>[35]</sup>, considerando a formulação do furo cego, podem ser introduzidos.

A medição de deslocamentos com o interferômetro radial pode ser afetada por diversas fontes de instabilidade. Perturbações de frequências mais elevadas são facilmente detectadas e devem ser eliminadas para viabilizar a medição. Há uma outra classe de instabilidade, que introduz variações muito lentas, difícil de ser detectada. Variações de temperatura são um exemplo.

O efeito das instabilidades de baixa frequência sobre o campo medido é a elevação do nível de fundo, isto é, um termo constante é adicionado a todos os pontos medidos. A adição de um termo constante nos deslocamentos medidos vai introduzir erros nos cálculos efetuados nos algoritmos dos harmônicos e mínimos quadrados.

Para conviver com a presença de um termo aditivo constante, Albertazzi Jr. e Rodacoski<sup>[54]</sup> desenvolveram um algoritmo específico. O algoritmo discretiza dados de forma regular em pelo menos dois anéis de amostragem com raios diferentes. O valor do deslocamento médio ( $\bar{u}_r$ ) de cada anel é calculado. O valor médio da equação do deslocamento em um anel fechado é função apenas do raio  $r$  e é dado por:

$$\bar{u}_r(r) = \frac{1+\nu}{2E} Ro^2 (\sigma_1 + \sigma_2) \frac{1}{r} + NF \quad (3.20)$$

onde:

$NF$  é um termo constante que representa a elevação do nível de fundo do campo

A equação 3.20 pode ser reescrita como:

$$\bar{u}_r(r) = K \frac{1}{r} + NF \quad (3.21)$$

sendo:

$$K = \frac{1+\nu}{2E} Ro^2 (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.22)$$

Sendo esta equação escrita para dois anéis de amostragem com raios distintos, é possível determinar as constantes “ $K$ ” e “ $NF$ ”. Se mais que dois anéis de amostragem forem envolvidos, estas mesmas constantes podem ser determinadas pelo método dos mínimos quadrados. Uma vez determinado o valor da constante “ $K$ ”, é possível calcular a soma das tensões residuais, independentemente do valor do nível de fundo “ $NF$ ”. Como a diferença das tensões residuais, determinada pelo segundo harmônico da equação 14, não é afetada pelo nível de fundo, a determinação de cada componente de tensão residual pode ser feita com segurança.

### 3.7.2 Procedimento de Ensaio

Hoje ainda não existe um procedimento padronizado para determinação de tensões residuais usando holografia, uma vez que a técnica ainda está sendo desenvolvida. As principais diferenças entre os diversos procedimentos experimentais usando holografia estão na forma pela qual a peça a ser testada é iluminada e como os dados são adquiridos e processados. Contudo, pode-se dizer que o ensaio segue uma seqüência bastante semelhante àquela utilizada na extensometria.

Após uma rápida limpeza da superfície da peça, esta é pintada com tinta branca fosca ou com qualquer outro recobrimento branco que garanta uma superfície com propriedades ópticas homogêneas. A peça é iluminada sob certas condições, determinadas pelo tipo de interferômetro, e uma imagem de referência é adquirida através de uma câmera de TV e armazenada em computador. Na seqüência, é iniciado o processo de furação. Para cada incremento na profundidade deve ser adquirida uma nova imagem. Esta imagem, subtraída da referência, permite que, através dos algoritmos adequados de processamento, sejam determinados os deslocamentos

resultantes e, conseqüentemente, as tensões.

Neste trabalho se propõe iluminar a peça através de um interferômetro de espelhos cônicos e medir a componente radial dos deslocamentos gerados pela introdução de um furo na peça sob tensão.

### **3.7.3 Fontes de Erros e Limitações**

Vibrações mecânicas, transientes rápidos de temperatura e flutuações do índice de refração do ar fazem com que a holografia apresente limitações para uso em campo mais severas do que a extensometria. A influência destes fatores pode ser minimizada através da construção de um sistema de medição robusto e algoritmos adequados de processamento.

Um estudo mais detalhado, considerando o uso de um interferômetro de espelhos cônicos é apresentado, no item 3.8.

## **3.8 Comparação entre Holografia e Extensometria**

As principais vantagens da extensometria na medição de tensões residuais são:

- procedimento de ensaio padronizado e bem aceito internacionalmente;
- equipamento e assessores disponíveis no mercado;
- possibilidade de medição em vários tipos de ambientes e posições;
- facilidade de processamento e quantificação dos resultados.

A técnica, apesar de ter seu uso bastante difundido, apresenta algumas desvantagens:

- o cuidado e o tempo necessários na preparação da superfície da peça e colagem dos extensômetros;
- a medição em pequeno número de pontos (3) pode levar a erros consideráveis;
- requer muito bom alinhamento entre o furo e centro da roseta;

- dificuldade em executar medições localizadas, devido à característica da leitura indicada pelo extensômetro ser resultado da integração do campo de deformação sobre sua área. Existem rosetas pequenas para medições localizadas, porém as incertezas associadas aumentam.

Albertazzi et al.<sup>[55, 56, 57]</sup> fizeram um estudo prévio da adequação de um interferômetro radial para a medição de tensões residuais através do método do furo. Vantagens associadas a este tipo de interferômetro são:

- amostragem em um ou vários anéis e a medição do campo completo de deslocamentos, uma vez que o volume de dados amostrados é muito maior do que nas técnicas convencionais. Através de técnicas de minimização de erros (mínimos quadrados) é possível reduzir a influência de erros aleatórios;
- possibilidade de detectar e tratar plastificação localizada. A amostragem pode ser feita fora da região plastificada;
- é possível medir valores localizados;
- pouca ou nenhuma preparação da superfície de medição, reduzindo os tempos de instalação e custo por ponto de medição.

As principais desvantagens são:

- as condições ambientais para realizar os ensaios não podem ser tão severas quanto na extensometria;
- custo de aquisição elevado;
- a técnica ainda é pouco difundida.

### **3.8.1 Influência das Incertezas Associadas às Técnicas de Medição**

Os algoritmos utilizados neste trabalho para cálculo dos erros associados à medição com extensômetros foram desenvolvidos por Sandifer e Bowie<sup>[58]</sup>, Wang<sup>[59]</sup> e Ajovalasit<sup>[60]</sup>.

Em todos os cálculos que se seguem são considerados os seguintes valores para o raio do furo e configurações da roseta (extensometria) e do interferômetro radial (holografia):

Raio do furo: 0,45mm

Dados da roseta:

Raio Médio de Amostragem: 2,565mm

Dimensão dos Extensômetros: 1,59mm x 1,61mm

Dados do interferômetro:

Sensibilidade: 1,73

Raio de Amostragem: 2,00mm

Na extensometria, a incerteza no cálculo das tensões principais ( $\Delta\sigma_1$ ,  $\Delta\sigma_2$ ) devido à incerteza na determinação das deformações ( $\Delta\varepsilon_i$ ) pode ser determinado derivando a equação 3.13 em relação a  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$ . Para fins de cálculo foi considerada uma incerteza  $\Delta\varepsilon_i$  de  $\pm 2 \mu\text{m/m}$ , de acordo com as recomendações da norma ASTM E837.

A Tabela 3.1 mostra a influência sobre os valores calculados de tensão associado à incerteza nas deformações medidas.

Estado de Tensões de Referência			Resultados		
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [°]	$\Delta\sigma_1$ [MPa]	$\Delta\sigma_2$ [MPa]	$\Delta\beta$ [°]
100	50	30	$\pm 6,2$	$\pm 10,2$	$\pm 3,4$
100	0	30	$\pm 6,2$	$\pm 10,0$	$\pm 1,7$
100	-50	30	$\pm 6,2$	$\pm 10,2$	$\pm 1,1$

Tabela 3.1- Incerteza nos resultados das tensões principais devido às incertezas nas deformações medidas

Na holografia, a quantificação de tensões residuais através do interferômetro

radial parte da medição do campo de deslocamentos radiais em torno do furo. A equação básica é:

$$u_r = \frac{-\lambda OF}{2 \sin(2\alpha_{radial})} \quad (3.23)$$

onde:

$u_r$  : deslocamento radial medido

$\lambda$  : comprimento de onda da luz do laser (HeNe)

$OF$ : a ordem de franja

$\alpha_{radial}$  : ângulo do espelho cônico do interferômetro radial

A incerteza da medição do deslocamento em um ponto é dada pela equação:

$$\Delta u_r = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial u_r}{\partial \lambda} \cdot \Delta \lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial OF} \cdot \Delta OF\right)^2 + \left(\frac{\partial u_r}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha_{radial}\right)^2} \quad (3.24)$$

Devido à qualidade dos lasers hoje disponíveis, a incerteza no comprimento de onda do laser ( $\Delta \lambda$ ) é da ordem  $\pm 0,03$  nm. A incerteza na determinação da ordem de franja está associada a fatores como contraste das franjas, ruído nas imagens, erros no processo de deslocamento de fase, filtragem e processamento dos dados. Nas medições com holografia é comum se trabalhar com uma incerteza na ordem de franja ( $\Delta OF$ ) de  $\pm 1/30$  a  $\pm 1/15$ . Nestas simulações foi considerada  $\Delta OF$  de  $\pm 1/15$ . A incerteza associada ao ângulo do espelho cônico ( $\Delta \alpha_{radial}$ ) é consequência do processo de fabricação. Admite-se para este ângulo uma incerteza típica de  $\pm 0,5^\circ$ .

A incerteza combinada  $\Delta u_r$  para a determinação do deslocamento em cada ponto é estimada em  $\pm 25$  nm. Uma vez que no cálculo das tensões é considerado um grande número de pontos, a incerteza final pode ser reduzida através de minimização por mínimos quadrados.

O efeito de  $\Delta u_r$ , avaliado através de simulação numérica, sobre as tensões calculadas é apresentado na Tabela 3.2.

Estado de Tensões de Referência			Resultados		
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [°]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [°]
100	50	30	100,29 ± 2,78	49,91 ± 2,48	30,03 ± 1,36
100	0	30	99,54 ± 3,39	-0,34 ± 3,12	29,93 ± 0,83
100	-50	30	99,41 ± 3,36	-50,02 ± 2,56	30,00 ± 0,48

*Tabela 3.2 - Erros nos resultados das tensões principais devido às incertezas nos deslocamentos medidos*

**3.8.2 Fatores Inerentes ao Método do Furo e sua Influência sobre as Técnicas de Medição**

**3.8.2.1 Descentragem do Furo**

O furo deve ser idealmente executado no centro da roseta extensométrica ou coincidente com o ponto onde o eixo óptico do interferômetro intercepta a superfície da peça. É normal, no entanto, ocorrerem pequenos erros de centragem. O efeito destes erros sobre cada uma das técnicas é avaliado a seguir. As Tabela 3.3 e 3.4 mostram, respectivamente, a influência da descentragem na extensometria e na holografia combinada com o interferômetro radial.

Medições confiáveis requerem que o furo seja muito bem centrado ou que a descentragem seja medida e compensada matematicamente. Uma guia adequada de furação e uma lente que auxilie na centragem do sistema de furação garantem que sejam obtidos furos com excentricidades inferiores a 0,1 mm.

Os resultados da Tabela 3.3 mostram que o efeito da descentragem é crítico no caso da utilização de extensômetros. Os resultados variam considerando a como se



relacionam a excentricidade do furo executado, o módulo e a direção das tensões principais.

Tensões de Referência			Excentricidade		Resultados	
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [°]	Valor [mm]	$\theta_e$ [°]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
100	50	30	0,1	0	100,7	50,3
100	50	30	0,1	45	95,8	49,6
100	50	30	0,1	90	93,8	50,3
100	0	30	0,1	0	99,1	-5,0
100	0	30	0,1	45	89,7	-9,8
100	0	30	0,1	90	87,0	-6,7
100	-50	30	0,1	0	97,6	-60,3
100	-50	30	0,1	45	83,6	-69,3
100	-50	30	0,1	90	80,3	-63,7

*Tabela 3.3 - Efeito da descentragem do furo sobre os resultados obtidos por extensometria*

O interferômetro radial combinado com uma técnica de processamento adequada tem uma sensibilidade muito pequena à descentragem, conforme mostram os resultados da Tabela 3.4.

Tensões de Referência			Excentricidade		Resultados	
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [°]	Valor [mm]	$\theta_e$ [°]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
100	50	30	0,1	0	99,99	50,01
100	50	30	0,1	45	100,01	49,99
100	50	30	0,1	90	99,93	50,07

Tensões de Referência			Excentricidade		Resultados	
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [°]	Valor [mm]	$\theta_e$ [°]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
100	0	30	0,1	0	99,94	0,06
100	0	30	0,1	45	99,95	0,05
100	0	30	0,1	90	99,90	0,10
100	-50	30	0,1	0	99,89	-49,89
100	-50	30	0,1	45	99,90	-49,90
100	-50	30	0,1	90	99,87	-49,87

*Tabela 3.4 - Efeito da descentragem do furo sobre os resultados obtidos através de holografia*

### 3.8.3 Efeito da Amostragem sobre a Área dos Extensômetros de Resistência

A combinação dos efeitos de integração sobre a área e descentragem do furo leva a resultados com grandes parcelas de erros. A compensação matemática deste somatório de efeitos é tarefa bastante difícil e normalmente não é utilizada de forma correta na prática. As fórmulas descritas na norma ASTM E837-92 não são adequadas quando se têm furos descentrados.

Os resultados a seguir mostram que pelo fato do interferômetro permitir uma amostragem localizada (puntual) é possível obter resultados mais confiáveis.

O resultado obtido através de extensômetros depende fortemente do sinal e orientação das tensões principais em relação ao eixo coordenado de referência quando combinados os efeitos da descentragem e integração.

O efeito da integração que ocorre nos extensômetros pode ser compensado matematicamente. Contudo, é necessário determinar com exatidão as dimensões do extensômetro, bem como assegurar-se da sua repetibilidade em cada elemento da roseta. A calibração experimental também é uma alternativa para compensação.

A Tabela 3.5 mostra como a integração do campo de deformações sobre a área ativa do extensômetro afeta o cálculo das tensões principais.

A Tabela 3.6 considera ainda a superposição de excentricidade entre o furo e o centro da roseta.

Estado de Tensões de Referência			Resultados	
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [°]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
100	50	30	94,6	52,4
100	0	30	91,2	6,8
100	-50	30	87,8	-38,8

Tabela 3.5 - Efeito da integração da deformação sobre a área dos extensômetros nos resultados

Tensões de Referência			Excentricidade		Resultados	
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	$\beta$ [°]	Valor [mm]	$\theta$ [°]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
100	50	30	0,1	0	95,3	53,0
100	50	30	0,1	45	91,7	53,2
100	50	30	0,1	90	90,0	53,7
100	0	30	0,1	0	90,5	2,7
100	0	30	0,1	45	83,6	-0,14
100	0	30	0,1	90	81,5	2,55
100	-50	30	0,1	0	85,8	-42,7
100	-50	30	0,1	45	75,5	-53,3
100	-50	30	0,1	90	73,0	-48,6

Tabela 3.6 - Efeito da descentragem do furo combinado com a integração ao longo dos extensômetros sobre os resultados obtidos por extensometria

3.8.4 Diâmetro e Geometria do Furo

A sensibilidade de ambas as técnicas está diretamente associada com o diâmetro do furo executado. Este tem uma influência não linear, de forma que pequenas variações podem gerar grandes erros no cálculo das tensões.

O diâmetro do furo tem influência apenas sobre os resultados das tensões principais e não na sua direção.

As extensometria e a holografia combinada com o interferômetro radial são afetadas igualmente pela variação do diâmetro do furo.

A Tabela 3.7 e a Tabela 3.8 mostram, respectivamente, a influência da variação do diâmetro sobre as tensões calculadas a partir dos resultados obtidos através de extensômetros ou pelo interferômetro radial.

Nos resultados apresentados a seguir foram considerados os seguintes parâmetros:  $E = 207000 \text{ MPa}$  e  $\nu = 0,27$ .

Tensões de Referência		Furo		Resultados	
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	Raio [mm]	$\Delta$ raio [mm]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
100	50	0,45	0,01	104,46	52,28
100	50	0,45	0,05	123,24	61,95
100	50	0,80	0,01	102,45	51,32
100	50	0,80	0,05	112,52	56,82
100	-50	0,45	0,01	104,34	-52,14
100	-50	0,45	0,05	122,80	-61,07
100	-50	0,80	0,01	102,32	-51,06
100	-50	0,80	0,05	111,78	-55,33

Tabela 3.7 - Efeito da variação do diâmetro do furo sobre o valor das tensões residuais calculadas a partir de extensometria

Tensões de Referência		Furo		Resultados	
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	Raio [mm]	$\Delta$ raio [mm]	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
100	50	0,45	0,01	104,58	52,32
100	50	0,45	0,05	126,45	63,39
100	50	0,80	0,01	102,51	51,31
100	50	0,80	0,05	115,59	57,07
100	-50	0,45	0,01	104,54	-52,24
100	-50	0,45	0,05	126,24	-62,96
100	-50	0,80	0,01	102,45	-51,17
100	-50	0,80	0,05	113,23	-56,34

*Tabela 3.8 - Efeito da variação do diâmetro sobre o valor das tensões residuais calculadas a partir de holografia*

**3.8.5 Propriedades Mecânicas do Material**

Neste item serão avaliadas a influência de propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson sobre os resultados obtidos através de extensometria e holografia combinada com o interferômetro radial

O módulo de elasticidade não tem influência sobre a direção das tensões principais. O efeito do módulo de elasticidade sobre o valor em módulo das tensões principais calculadas é diretamente proporcional à razão entre sua variação e seu valor nominal.

O coeficiente de Poisson tem pequena influência sobre os resultados.

Os parâmetros avaliados têm a mesma influência sobre a holografia e a extensometria.

As Tabelas 3.9 e 3.10 mostram como as propriedades mecânicas do material afetam os resultados obtidos no cálculo das tensões principais quando utilizadas a extensometria ou holografia.

Tensões de Referência		Material				Resultados	
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	E [GPa]	$\Delta E$ [GPa]	$\nu$	$\Delta \nu$	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
100	50	207	20,7	0,27	0	90,9	45,4
100	50	207	0	0,27	0,03	101,8	51,8
100	50	207	20,7	0,27	0,03	92,5	47,1

*Tabela 3.9 - Efeito dos parâmetros E e  $\nu$  sobre o valor das tensões residuais calculadas a partir de extensometria*

Tensões de Referência		Material				Resultados	
$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]	E [GPa]	$\Delta E$ [GPa]	$\nu$	$\Delta \nu$	$\sigma_1$ [MPa]	$\sigma_2$ [MPa]
100	50	207	20,7	0,27	0	90	45
100	50	207	0	0,27	0,03	101,5	51,5
100	50	207	20,7	0,27	0,03	91,6	46,6

*Tabela 3.10 - Efeito dos parâmetros E e  $\nu$  sobre o valor das tensões residuais calculadas a partir de holografia*

#### 4. Medição de Deslocamentos Radiais com Holografia

A holografia eletrônica ou ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) conjugada com um interferômetro de espelhos cônicos é a técnica utilizada neste trabalho para a medição de deslocamentos radiais. Na holografia eletrônica, a aquisição das imagens é feita utilizando uma câmera de vídeo e o processamento dos dados adquiridos se dá através de placas especiais acopladas a um microcomputador.

A técnica ESPI está baseada na medição da alteração da fase da luz que atinge e é refletida pelo objeto. À medida em que o objeto se deforma, muda o ângulo de fase relativo das frentes de onda que interferem junto à sua superfície. Estas mudanças de fase são caracterizadas pela alteração, ponto a ponto<sup>26</sup>, da intensidade luminosa. Uma câmera de vídeo tipo CCD<sup>61</sup> registra estas alterações de intensidades. Através de técnicas adequadas de processamento é possível relacionar a alteração de intensidade com a alteração de fase. Uma vez que sejam conhecidos o comprimento de onda do laser e o ângulo de iluminação gerado pelo interferômetro, determinam-se, a partir das mudanças de fase, os deslocamentos.

A iluminação adequada da peça é um parâmetro importante na qualidade do padrão de interferência obtido. Uma das maiores dificuldades do emprego desta técnica na medição de deslocamentos radiais é a sensibilidade a fatores ambientais como vibrações mecânicas, gradientes térmicos e correntes de ar. Iluminar adequadamente a região a ser medida considerando o número e a portabilidade dos componentes envolvidos, além de facilitar o processamento e interpretação dos resultados também permanece como uma questão a ser resolvida.

Neste contexto, o desenvolvimento de um interferômetro com sensibilidade radial compacto e robusto é um passo importante na medição do campo completo de deslocamentos radiais, eliminando de uma forma bastante simples e eficiente os problemas inerentes às técnicas até então utilizadas.

---

<sup>26</sup> Apesar de ser um efeito pontual, a representação é discreta, dependendo do tamanho do speckle subjetivo e do pixel da câmera.

## **4.1 *Princípios da Holografia Eletrônica ESPI***

A holografia eletrônica está baseada na geração e processamento digital de franjas de interferência resultantes da deformação do objeto que está sendo analisado. Alguns detalhes referentes a estas duas etapas serão comentados a seguir.

### **4.1.1 *As Franjas de Interferência***

Na holografia eletrônica, as franjas de interferência são obtidas através da subtração de uma imagem de referência (correspondente a um estado inicial do objeto) de uma imagem do objeto deformado.

As imagens que correspondem aos diferentes estados de deformação são adquiridas através de uma câmera de vídeo e digitalizadas por meio de uma placa de processamento de imagens. Neste trabalho foram utilizadas câmeras de vídeo analógicas<sup>27</sup>. O sinal de vídeo é digitalizado pela placa de processamento de imagens, através de um conversor analógico/digital. Uma vez digitalizada, a imagem original pode ser modificada através de funções matemáticas normalmente introduzidas através de um programa de computador. Estas informações podem ser alocadas em "buffers" de memória disponíveis na placa de processamento ou no computador hospedeiro. Através da programação de diferentes funções matemáticas, uma série de operações posteriores pode ser realizada.

Embora o princípio de formação das franjas na holografia eletrônica seja simples, alguns conceitos importantes serão discutidos a seguir.

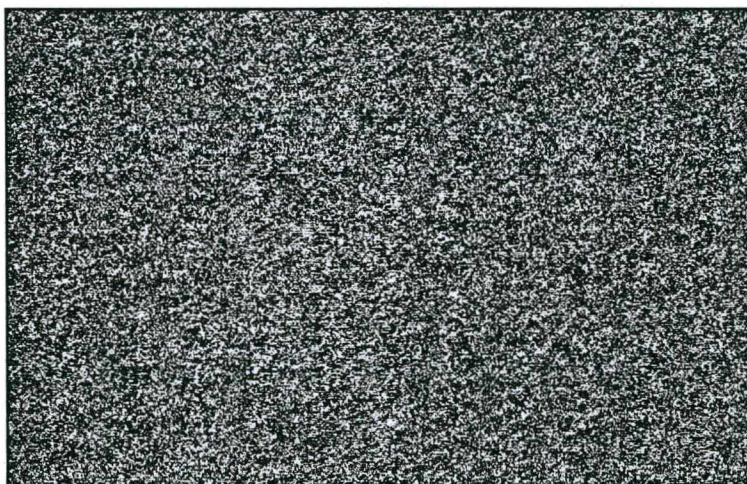
#### **4.1.1.1 *O Speckle***

Um efeito importante, ao qual as franjas de interferência estão diretamente relacionadas, é o speckle<sup>[62, 63]</sup>. O speckle resulta da interferência construtiva e destrutiva das frentes de onda que são aleatoriamente refletidas por uma superfície



opticamente rugosa<sup>28</sup>. Com iluminação branca, este fenômeno é muito difícil de ser observado<sup>29</sup>. Contudo, quando iluminada com laser, a superfície assume uma aparência granular típica.

A luz que forma cada speckle é totalmente coerente, de forma que padrões de interferência podem ser observados. Além da intensidade luminosa mensurável de cada speckle, este possui uma fase bem definida, que é diferente dos speckles vizinhos mas que com eles mantém uma relação bem determinada. A partir do momento em que estas propriedades foram compreendidas, começou a se desenvolver um novo tipo de interferometria. Nesta técnica os efeitos de interferência não produziam diretamente um padrão regular de franjas claras e escuras, mas uma alteração na distribuição das intensidades entre speckles individuais. Era assim necessário utilizar novas formas para detectar e apresentar esta alteração. Surgia então a interferometria speckle ou ESPI, onde a subtração de padrões de speckle, correspondentes a diferentes estados de deformação do objeto, permite apresentar, através de mapas de franjas bastante ruidosos, as alterações de fase decorrentes da deformação do objeto



*Figura 4.1 - Padrão de speckle (fase) típico de uma superfície iluminada com luz monocromática coerente*

---

<sup>27</sup> A saída destas câmeras segue o padrão RS-170; um sinal analógico que varia entre 1V pico a pico.

<sup>28</sup> Rugosidade da ordem do comprimento de onda da luz que ilumina a superfície da peça.

<sup>29</sup> Devido à baixa coerência temporal e espacial da luz branca.

Outras propriedades importantes de um padrão de speckle são o contraste e o tamanho. Goodman<sup>[63]</sup> demonstrou que a função densidade de probabilidade  $P_I(I)$  para a intensidade de um padrão de speckle é determinada por:

$$P_I(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} e^{\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right)} \quad (4.1)$$

onde:

$\langle I \rangle$  é a intensidade média.

Segundo esta equação, o valor mais provável de intensidade é zero, ou seja, um ponto escuro. Uma medida do contraste do padrão de speckle é dado pela razão entre o desvio padrão da distribuição de intensidades e a intensidade média  $\langle I \rangle$ . A distribuição de intensidades, avaliada a partir de histogramas, é um parâmetro que tem importante influência sobre a qualidade das franjas de interferência. A faixa dentro da qual varia o nível de intensidade apresentado no monitor depende da resolução do conversor A/D da placa de processamento, da resolução dinâmica e do fator gama da câmera de vídeo, e da "look-up table" utilizada na conversão dos valores de entrada na placa de processamento.

A Figura 4.2 mostra uma distribuição típica, onde o valor zero corresponde a pontos de escuridão total e o valor 255 a pontos de máximo brilho. Píxeis que teriam intensidades (brilho) menor do que zero ou acima de 255 são convertidos para estes valores, respectivamente.

O tamanho do speckle, quando observado através de uma câmera de televisão, é dado por:

$$T_s = (1 + m)\lambda F \quad (4.2)$$

onde:

$T_s$  é o tamanho do speckle em  $[\mu\text{m}]$

$m$  é a ampliação utilizada, [adimensional]

$\lambda$  é o comprimento de onda do laser em  $[\mu\text{m}]$

$F$  é a abertura numérica ou F number do sistema de lentes [adimensional]



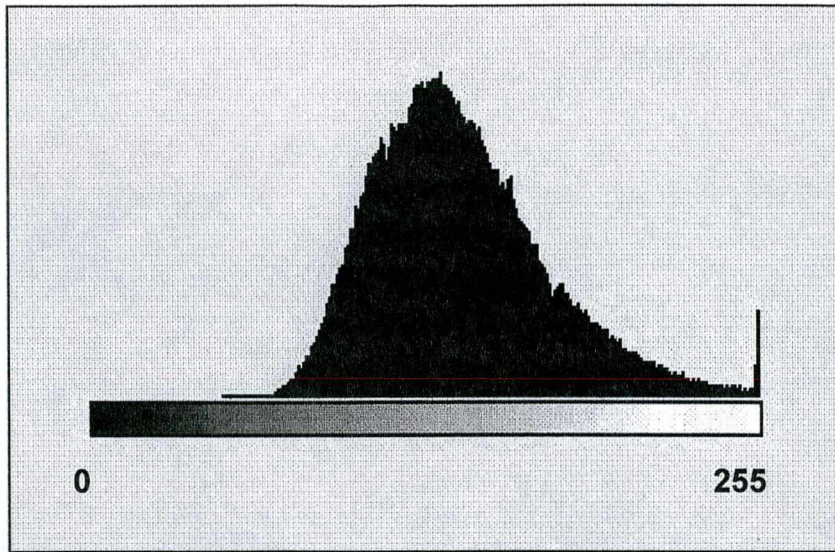


Figura 4.2 - Histograma<sup>30</sup> típico para um padrão de speckle interferométrico

Normalmente se procura fazer coincidir o tamanho do speckle com as dimensões de cada uma das células (pixeis) que constituem a matriz de elementos fotossensores da câmara CCD. Para iluminação com laser He-Ne ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ), ampliação variando entre 0,6 e 1 e tamanho do pixel de  $10 \mu\text{m}$ , costuma-se utilizar aberturas numéricas entre 8 e 11.

#### 4.1.1.2 A Formação das Franjas

Dois fechos<sup>31</sup> de laser coerentes<sup>[64]</sup> entre si com intensidades  $I_1(x,y)$  e  $I_2(x,y)$  e fases  $\theta_1(x,y)$  e  $\theta_2(x,y)$ , iluminando uma superfície, interferem entre si originando um padrão de speckle dado por  $I_{int}(x,y)$  e  $\theta(x,y)$  que é captado pela câmara CCD. O padrão de speckle resultante é dado por:

$$I_{int}(x,y) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta_{(x,y)} \quad (4.3)$$

onde:

<sup>30</sup> Num histograma são plotados o número de píxeis no eixo ordenado e o nível de intensidade luminosa nas abcissas.

<sup>31</sup> Neste texto utiliza-se o termo fecho para uma coleção de raios, enquanto que o termo feixe refere-se a um raio apenas.

$I_{int}(x,y)$  é a intensidade do padrão de speckle resultante

$\theta(x,y)$  é a diferença de fase entre os fechos 1 e 2.

As franjas de correlação, resultantes da deformação do objeto, são obtidas armazenando o mapa de speckle interferométrico do objeto indeformado como uma imagem de referência  $I_{ref}(x,y)$ . A imagem de referência é continuamente subtraída das imagens que vão sendo adquiridas a medida em que o objeto se deforma  $I_{def(i)}(x,y)$ . Esta diferença, que é mostrada num monitor de vídeo sob a forma de franjas, é dada por:

$$I_{subt} = |I_{def(i)} - I_{ref}| = 4\sqrt{I_1 I_2} \left| \sin\left(\theta + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \right| \left| \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right| \quad (4.4)$$

onde:

$\theta$  é a diferença de fase  $\theta_1 - \theta_2$

$\Delta\phi = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$ , é a mudança de fase do fecho 1 em relação ao fecho 2.

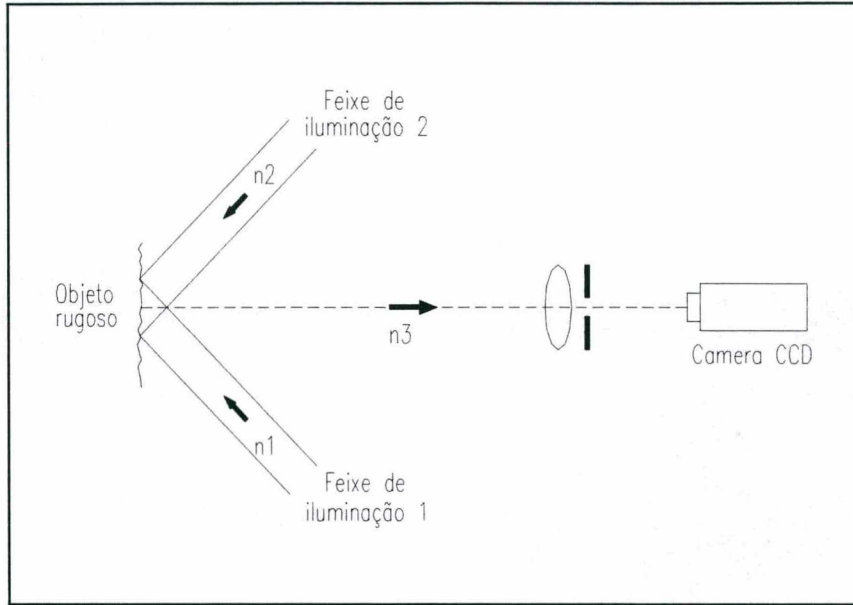
O termo  $\left| \sin\left(\theta + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \right|$  representa o nível de ruído de fundo do padrão de interferência. O ruído de fundo é modulado pelo termo  $\left| \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right|$ , que descreve as franjas de interferência.

Os padrões de franjas originados em ESPI são similares aos obtidos com holografia interferométrica clássica, porém com muito mais ruído. O ruído é causado pela modulação aleatória de alguns pontos do padrão de speckle e também por pontos que perderam correlação entre o estado inicial e final.

#### 4.1.1.3 Dupla Iluminação e Sensibilidade

Leendertz<sup>[65]</sup> em 1970 mostrou que a medição de microdeslocamentos no plano pode ser implementada iluminando o objeto através de dois fechos de luz colimada e coerente, ambos incidindo sob um ângulo  $\phi$  com a normal à superfície (Figura 4.3). Cada um dos feixes gera seu próprio padrão de speckle, o qual se combina com o

padrão gerado pelo feixe complementar. Este tipo de configuração é denominado de dupla iluminação.



*Figura 4.3. Dupla iluminação para medição de deslocamentos no plano*

Seja  $\vec{n}_i$  um vetor unitário na direção de iluminação apontando para o objeto e  $\vec{n}_o$  um vetor unitário na direção de observação saindo do objeto. A alteração de fase  $\Delta\psi$ , introduzida por um deslocamento  $\vec{d}$  do objeto, pode ser expressa por:

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_i - \vec{n}_o) \cdot \vec{d} \quad (4.5)$$

Desta forma, a mudança de fase que gera franjas de correlação pode ser escrita como:

$$\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d} \cdot [(\vec{n}_1 - \vec{n}_3) - (\vec{n}_2 - \vec{n}_3)] \quad (4.6)$$

Simplificando a equação 4.6:



$$\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d} \cdot (\vec{n}_1 - \vec{n}_2) \quad (4.7)$$

Substituindo o termo  $(\vec{n}_1 - \vec{n}_2)$  por  $\vec{p}$ , a equação 4.7 pode ser reescrita como:

$$\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{d} \cdot \vec{p} \quad (4.8)$$

O vetor  $\vec{p}$  é denominado de vetor sensibilidade. No caso particular em que  $\vec{n}_1$  e  $\vec{n}_2$  são orientados simetricamente em relação à normal à superfície, o vetor  $\vec{p}$  aponta numa direção paralela à superfície do objeto. Apenas a componente do deslocamento na direção do vetor sensibilidade provoca mudança de fase, dando origem às franjas de interferência

Ainda neste caso, se o objeto se mover na direção normal(z) ao plano que passa pela superfície da peça, os dois feixes que interferem vão sofrer as mesmas alterações de caminho óptico, de forma que o padrão de speckle interferométrico não se altera. Da mesma forma, não haverá alteração neste padrão de speckle se houver movimento no plano, porém numa direção (y) normal à determinada pelo vetor sensibilidade. Porém, qualquer movimento do objeto no plano e numa direção diferente da anterior, o caminho óptico de um dos braços será aumentado de  $d \sin(\varphi) \cos(\xi)$  enquanto que no braço complementar o caminho óptico é reduzido desta mesma quantidade. As grandezas  $d$  e  $\xi$  referem-se, respectivamente, à amplitude do deslocamento e ao ângulo formado entre a direção do deslocamento e a direção do vetor sensibilidade.

O número de franjas que será formado para um certo deslocamento  $d$  num ângulo  $\xi$  é dado por:

$$OF = \frac{2d \sin \varphi \cos \xi}{\lambda} \quad (4.9)$$

onde:

$OF$  é a ordem de franja (número de franja)

$d$  é o deslocamento,

$\varphi$  é o ângulo de iluminação (referenciado em relação à normal à superfície),

$\xi$  é o ângulo formado entre a direção do deslocamento com a direção determinada pelo vetor sensibilidade.

Conforme a equação acima, quanto menor for o comprimento de onda do laser e quanto maior for o ângulo  $\varphi$ , ou seja, quanto mais aberta for a iluminação, maior será o número de franjas formado para um mesmo deslocamento  $d$ . O número de franjas também aumenta à medida em que a direção do deslocamento se aproxima da direção do vetor sensibilidade.

A equação 4.9 pode ser escrita vetorialmente como:

$$OF = \frac{\vec{p} \cdot \vec{d}}{\lambda} \quad (4.10)$$

Note-se que a diferença de fase  $\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2$  mantém com o número de ordem de franja  $OF$  uma relação de  $2\pi$ .

#### 4.1.2 Processamento

Se o vetor sensibilidade é invariante, as franjas de interferência representam regiões cuja componente do deslocamento na direção do vetor sensibilidade é constante. É comum fazer uma analogia entre o mapa de franjas e um mapa topográfico, cujas linhas representam pontos de altitude constante.

Normalmente se associa a cada franja um número inteiro sequencial, conhecido como ordem de franja. A franja de ordem zero corresponde a pontos de deslocamento nulo. As demais franjas são referenciadas em relação a franja zero, podendo ser positivas ou negativas. Apenas os pontos situados sobre as franjas escuras possuem ordem de franja inteira. Aos pontos entre franjas são associadas ordens de franjas não inteiras.

Através de técnicas adequadas de processamento são determinados os valores

da ordem de franja (ou fase) ponto a ponto. Os deslocamentos podem ser determinados através das equações 4.9 e 4.10.

#### 4.1.2.1 O Método do Deslocamento de Fase

O método do deslocamento de fase tem sido uma das técnicas mais empregadas para a quantificação de mapas de franjas. Seu desempenho é geralmente muito bom, independente do número, forma ou densidade das franjas.

Quando  $\Delta\phi(x,y)$  varia continuamente entre 0 e  $2\pi$  um ciclo do mapa de franjas é descrito. Se um ponto  $P(x_0, y_0)$  está situado sobre uma franja escura, então  $\Delta\phi(x_0, y_0)$  equivale a  $2\pi m_f$ ,  $m_f$  sendo inteiro. Enquanto um ciclo de fase é progressivamente aplicado no mapa de franjas, este ponto deixa de ser preto, passa por tons de cinza, fica claro e finalmente retorna a sua intensidade inicial. Se  $\Delta\phi(x_0, y_0)$  for diferente de  $2\pi m_f$ , a intensidade inicial deste ponto não é mínima, porém igualmente descreve um ciclo passando por todos os tons de cinza.

O valor da fase  $\Delta\phi(x,y)$  pode ser determinado ponto a ponto a partir da combinação de informações presentes em  $n_i$  imagens do mapa de franjas entre as quais deslocamentos de fase de  $2\pi/n_i$  são aplicados. O valor de  $\Delta\phi(x,y)$  é dado por:

$$\Delta\phi(x,y) = \tan^{-1} \left( \frac{-\sum_{j=1}^{n-1} I_{\text{int}} \left( x, y, 2\pi \frac{j}{n} \right) \sin \left( 2\pi \frac{j}{n} \right)}{\sum_{j=0}^{n-1} I_{\text{int}} \left( x, y, 2\pi \frac{j}{n} \right) \cos \left( 2\pi \frac{j}{n} \right)} \right) + 2m_f \pi \quad (4.11)$$

onde:

$n_i$  é o número de passos (imagens)

$m_f$  é um número inteiro a ser determinado

A equação 4.11 retorna um ângulo situado no intervalo  $[-\pi, \pi]$ , ou seja, na primeira volta do círculo trigonométrico. Entretanto,  $\Delta\phi(x,y)$  frequentemente assume valores fora da primeira volta, de forma que a determinação plena de  $\Delta\phi(x,y)$  depende de que o inteiro  $m_f$  seja conhecido. A ambigüidade envolvida na determinação de  $m_f$  é simples de ser resolvida quando se conhece a franja de ordem zero.



Algoritmos que empregam quatro ou cinco passos são os mais utilizados em aplicações usuais e têm a vantagem de minimizar a influência de erros aleatórios, produzindo mapas de fase com menos ruído superposto do que quando são usados algoritmos de três ou dois passos. No Anexo 3 é feita uma comparação entre diferentes algoritmos que podem ser usados com o interferômetro radial, buscando identificar o mais adequado.

#### **4.1.2.2 Quantificação do Deslocamento**

As equações básicas para determinar o deslocamento são:

$$d = \frac{\lambda OF}{2 \sin \varphi} \quad (4.12)$$

$$d = \frac{\lambda \Delta \phi}{4\pi \sin \varphi} \quad (4.13)$$

O comprimento de onda do laser e o ângulo de iluminação dependem da montagem utilizada no experimento e a fase ponto a ponto é obtida através do método do deslocamento de fase.

Em aplicações práticas, o deslocamento máximo processável depende da densidade de franjas e do ruído superposto no mapa de fases.

Operações de filtragem permitem reduzir o ruído presente no mapa de fases. Contudo, este artifício deve ser usado com cautela, uma vez que podem ser geradas distorções no mapa de fases original.

## **4.2 O Interferômetro Radial**

O interferômetro radial consiste de uma par de espelhos cônicos, que geram dupla iluminação com sensibilidade na direção radial em uma região de medição circular.

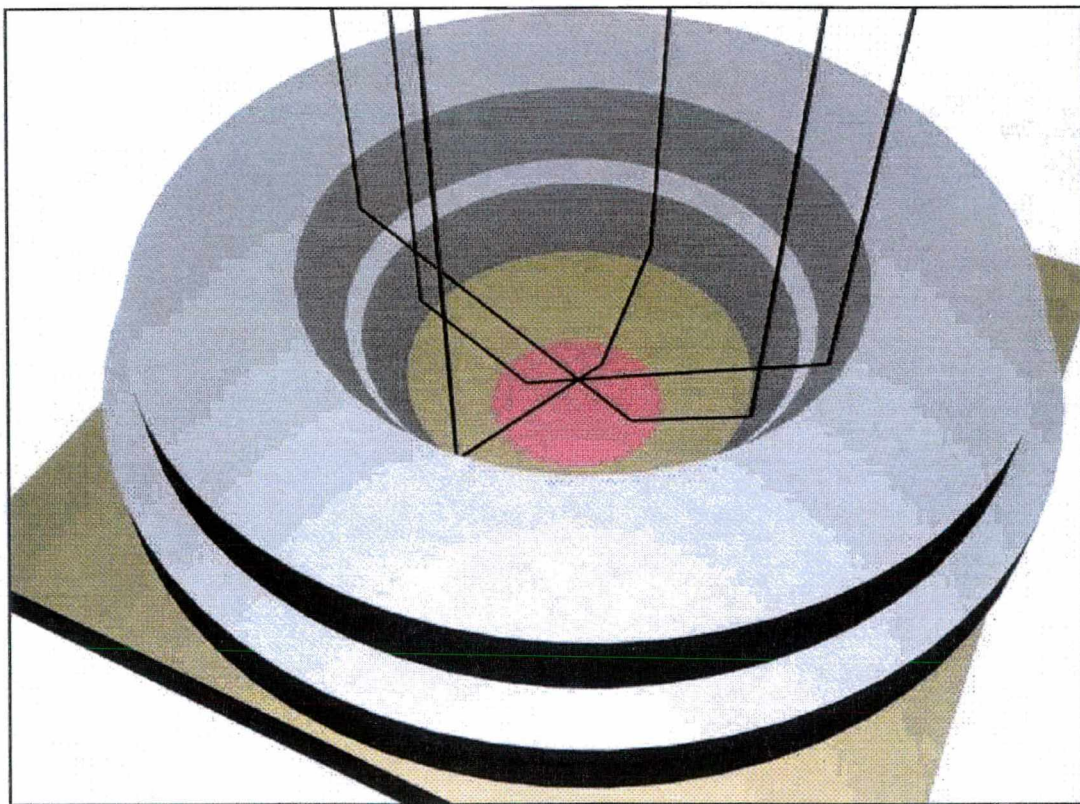
Mesmo que possam existir outras componentes de deslocamento, apenas a

componente radial do campo de deslocamentos é medida com este interferômetro.

#### 4.2.1 Princípio

O interferômetro de espelhos cônicos ou interferômetro radial apresentado neste trabalho pode ser classificado, de acordo com o seu princípio, como sendo de divisão de frente de onda<sup>[66]</sup>.

Um fecho colimado de laser incide sobre a superfície dos espelhos cônicos e é refletido em direção à peça a medir de forma a gerar uma região iluminada circular. Idealmente, cada ponto dentro desta região circular é formado pela interferência de um único par de raios, refletidos por pontos diametralmente opostos na superfície dos espelhos, porém em alturas diferentes (Figura 4.4). É importante que a luz que não é refletida pelos espelhos não incida diretamente sobre a região de medição.



*Figura 4.4 - Princípio de iluminação do interferômetro radial*



Fica assim caracterizada uma configuração típica de dupla iluminação. O vetor sensibilidade aponta na direção do centro, definindo a sensibilidade radial do interferômetro.

Mantendo constantes o comprimento de onda do laser e o índice de refração do meio, a sensibilidade pode ser alterada pela modificação do ângulo de iluminação do interferômetro ou através de iluminação não paralela (convergente ou divergente). A modificação do ângulo de iluminação do interferômetro requer a substituição do espelho. Por outro lado, a geração de luz não paralela pode ser facilmente conseguida através da translação da lente colimadora, posicionada à frente do interferômetro.

Idealmente, as intensidades e as direções de polarização dos pares de raios que interferem devem ser iguais e a superfície da peça a medir deve estar perpendicular ao eixo óptico do interferômetro, de forma que apenas deslocamentos radiais causem alterações no padrão de interferência. Componentes de deslocamentos em outras direções ou mesmo fora do plano não devem gerar franjas.

#### **4.2.2 Características**

Conforme citado no item 4.2.1, cada ponto da região de medição deveria ser determinado pela interferência de apenas dois raios. Contudo pequenas imperfeições geométricas e a rugosidade superficial dos espelhos geram uma iluminação diferente da ideal. Conforme a qualidade da superfície do espelho cônico ocorrem reflexões especulares ou difusas. O nível de influência destes fatores está diretamente relacionada com o processo de fabricação dos espelhos cônicos.

Outra característica importante deste interferômetro é a concentração variável de energia ao longo do diâmetro da região iluminada. Quanto mais próximo do centro desta região, maior a concentração de energia e, conseqüentemente, maior a intensidade luminosa do nível de fundo do padrão de interferência. Este fator é inerente à própria configuração de iluminação utilizada. Uma solução adotada para reduzir a intensidade luminosa no centro do interferômetro foi a criação de uma região de sombra, através remoção de uma seção dos espelhos que iluminaria esta região. O diâmetro da região “escura” é de cerca de 40% do diâmetro do furo a ser executado

durante o ensaio de medição de tensões, de forma que não ocorrem perdas de área de amostragem. As reflexões difusas que ocorrem nas superfícies internas dos espelhos fazem com que esta região, teoricamente escura, seja parcialmente iluminada.

A combinação destes diversos fatores resulta numa iluminação heterogênea cuja conseqüência é a diminuição do contraste das franjas de interferência.

O ângulo de polarização da luz também influi na qualidade da iluminação. Seus efeitos ainda não são bastante claros e precisam ser investigados com mais detalhe.

Embora tenham sido apontados vários fatores que podem causar diminuição ou variação do contraste das franjas ao longo da região de medição, ensaios realizados mostraram que seus efeitos têm pequena influência sobre os resultados das medições.

#### **4.2.3 Fabricação dos Espelhos Cônicos**

Os espelhos do interferômetro radial são fabricados através de usinagem de precisão por torneamento. As características da máquina-ferramenta, da ferramenta de corte e do tipo de material determinam a qualidade dos espelhos. Os primeiros conjuntos foram fabricados utilizando ferramentas de widia ou aço rápido e máquinas convencionais com rotações da ordem de 10000 rpm. Caso sejam necessárias, operações posteriores de polimento devem ser feitas com muito cuidado. Normalmente o polimento melhora a microgeometria da superfície porém reduz a qualidade de forma, uma vez que introduz ovalizações e abaulamentos.

Embora os resultados alcançados com esses processos tivessem sido bons, espelhos de melhor qualidade superficial foram obtidos a partir de usinagem em altíssima rotação com ferramenta de diamante. Esta técnica<sup>[67]</sup> permite gerar superfícies com rugosidade  $R_a$  da ordem 50 nm e qualidade de forma entre 10 e 200 nm, dispensando operações posteriores.

A maioria dos espelhos foi fabricada a partir de alumínio. Este material é barato, de fácil usinagem, a qualidade superficial obtida é boa e não há problemas de incompatibilidade química com ferramentas de diamante. Uma desvantagem deste material é sua baixa dureza, tornando a peça bastante susceptível a riscos. O



recobrimento da superfície com algum material mais duro é uma alternativa para contornar este problema.

O aço inoxidável é um material que também foi usado. A qualidade superficial obtida não é tão boa quanto no alumínio e a usinagem com ferramentas de diamante não é possível.

Na literatura<sup>[67]</sup> são indicados, para a obtenção de “superfícies ópticas” através de usinagem de ultraprecisão, os seguintes materiais: alumínio e ligas, cobre e ligas, ouro, níquel eletrolítico, zinco, platina e prata.

Também foi testada a fabricação por lapidação em vidro. O princípio consiste em lapidar internamente um cilindro de vidro com uma ferramenta cônica e posteriormente recobri-lo com uma fina camada de óxido de alumínio. Os primeiros resultados mostram que a técnica é viável, embora o tempo de fabricação seja elevado e a qualidade de forma não seja a mesma alcançada por torneamento.

#### **4.2.4 Aspectos Construtivos e Parâmetros de Projeto**

Devido à forma pela qual se tem implementado a técnica de deslocamento de fase, o interferômetro radial deve ser composto de dois espelhos, sendo um deles móvel.

O primeiro modelo de interferômetro radial construído consiste de dois espelhos internos cujas geratrizes dos perfis cônicos não estão alinhadas sobre uma mesma reta, embora tenham a mesma inclinação angular. Esta configuração, conforme é mostrada na Figura 4.5, permite que, mesmo separados, os espelhos cônicos iluminem toda uma região circular, inclusive o centro.

Algumas desvantagens desta concepção estão relacionadas à complexidade de fabricação e principalmente às condições de iluminação que são geradas. O diâmetro interno do espelho superior é muito maior do que o diâmetro do espelho inferior. Conseqüências diretas desta característica são:

- a necessidade de um maior caminho óptico para expansão e colimação do feixe de laser até o diâmetro do espelho superior;
- necessidade de maior potência de iluminação;

- diferença considerável entre as distâncias percorridas após a reflexão nas superfícies internas pelos feixes que interferem junto à superfície da peça. Como a distância percorrida pelos raios refletidos no espelho superior até à peça é muito maior do que no espelho inferior, decorre uma diferença entre as intensidades dos raios que interferem. Este efeito é tanto mais pronunciado quanto pior for a qualidade superficial dos espelhos (aumento das reflexões difusas) e maior for o diâmetro desejado para a região de medição.

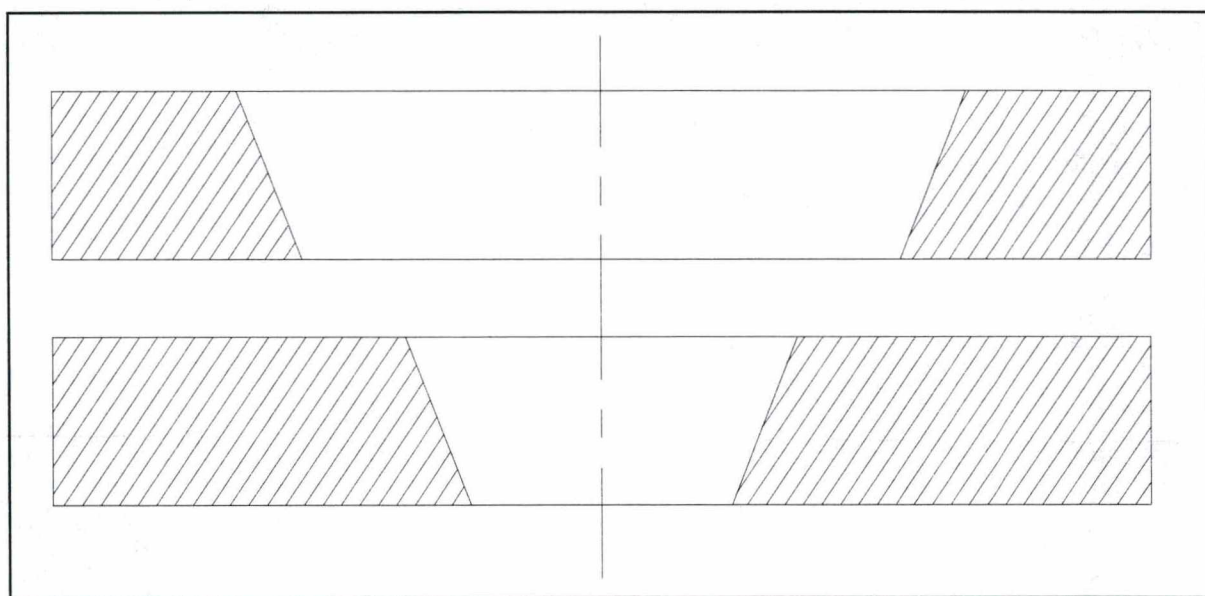
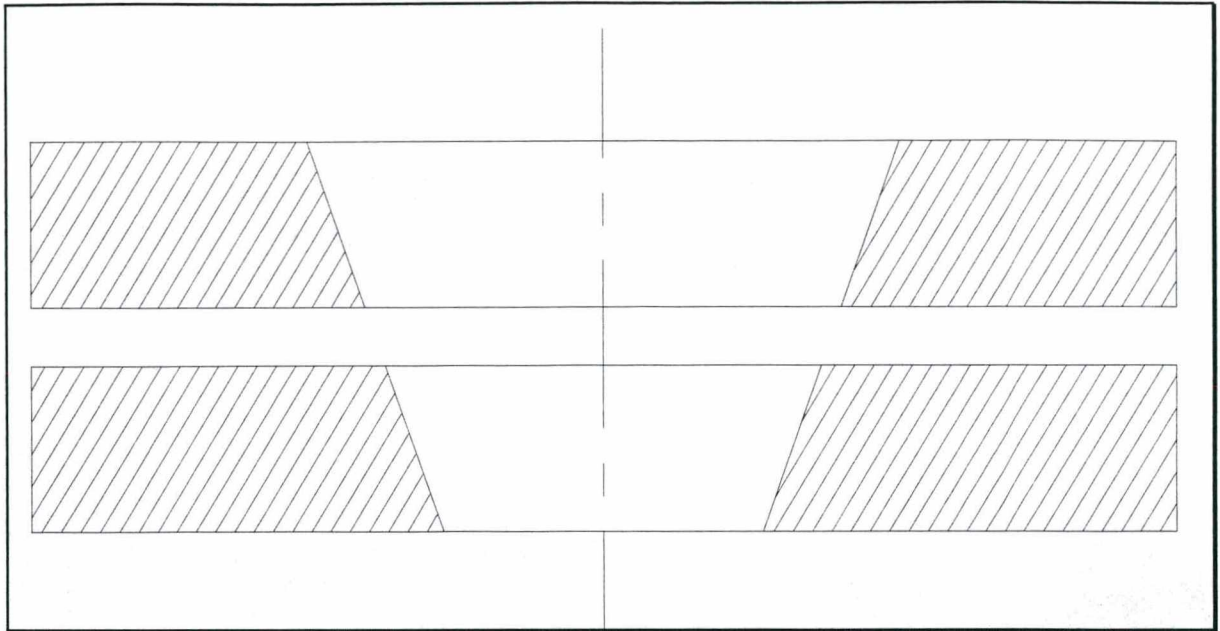


Figura 4.5 - Interferômetro radial em que as geratrizes que definem os espelhos cônicos internos não estão alinhadas sobre um mesmo eixo

A fim de contornar os problemas anteriores, foi concebido um segundo interferômetro, ligeiramente diferente do anterior. Nesta concepção, mostrada na Figura 4.6, as geratrizes dos dois espelhos cônicos internos estão alinhadas sobre um mesmo eixo<sup>32</sup>.

Os resultados experimentais obtidos com um interferômetro fabricado segundo esta nova concepção foram melhores quando comparados à primeira.

<sup>32</sup> A Figura 4.7 mostra mais detalhadamente os aspectos construtivos desta concepção.



*Figura 4.6 - Interferômetro radial cujas geratrizes dos perfis cônicos estão alinhadas sobre uma mesma reta*

A espessura dos espelhos do interferômetro, seus diâmetros e a distância entre eles são determinados considerando os seguintes parâmetros:

- o ângulo de iluminação ( $\alpha_{radial}$ );
- o diâmetro da região iluminada, ou seja, a área de medição ( $D_{med}$ );
- a distância focal ( $D_{foc}$ ), que corresponde a distância do espelho inferior do interferômetro à superfície da peça a ser medida;
- o diâmetro da região de sombra<sup>33</sup> ( $D_{sombra}$ ), que tem por objetivo diminuir a saturação luminosa na área central da região de medição.

A espessura dos espelhos ( $E_{esp}$ ) é calculada pela seguinte equação:

$$E_{esp} = \frac{1}{2} \left[ \frac{D_{med}}{\tan(\alpha_{radial}) - \tan\left(\frac{\alpha_{radial}}{2}\right)} - \frac{D_{sombra}}{\tan(\alpha_{radial}) - \frac{1}{\tan(\alpha_{radial})}} \right] \quad (4.14)$$

<sup>33</sup> Note-se que a área útil de medição é determinada pela diferença entre a região iluminada e a região central com sombra.



A separação ( $\Delta_{esp}$ ) entre os espelhos, que determina o diâmetro da sombra, é calculada por:

$$\Delta_{esp} = \frac{D_{sombra}}{\tan(\alpha_{radial}) - \frac{1}{\tan(\alpha_{radial})}} \quad (4.15)$$

O diâmetro menor do espelho inferior ( $Dm_{esp\ inf}$ ) é determinado segundo a equação:

$$Dm_{esp\ inf} = D_{med} + 2D_{foc} \tan(\alpha_{radial}) \quad (4.16)$$

O diâmetro maior do espelho superior ( $DM_{esp\ sup}$ ) é dado pelas equações:

$$DM_{esp\ sup} = 2 \tan\left(\frac{\alpha_{radial}}{2}\right) (2E_{esp} + \Delta_{esp}) + Dm_{esp\ inf} \quad (4.17)$$

$$DM_{esp\ sup} = 2 \left[ \tan\left(\frac{\alpha_{radial}}{2}\right) \left( \frac{D_{med}}{\tan(\alpha_{radial}) - \tan\left(\frac{\alpha_{radial}}{2}\right)} \right) \right] + Dm_{esp\ inf} \quad (4.18)$$

A Figura 4.7 mostra o interferômetro radial adotado e os principais parâmetros que definem seu dimensionamento.

A maioria dos experimentos apresentada neste trabalho foi feita utilizando um interferômetro com as seguintes características:

- distância focal de 3 mm;
- diâmetro da região de medição de 10 mm;
- ângulo de 60°;
- diâmetro da região de sombra de 0,5 mm .



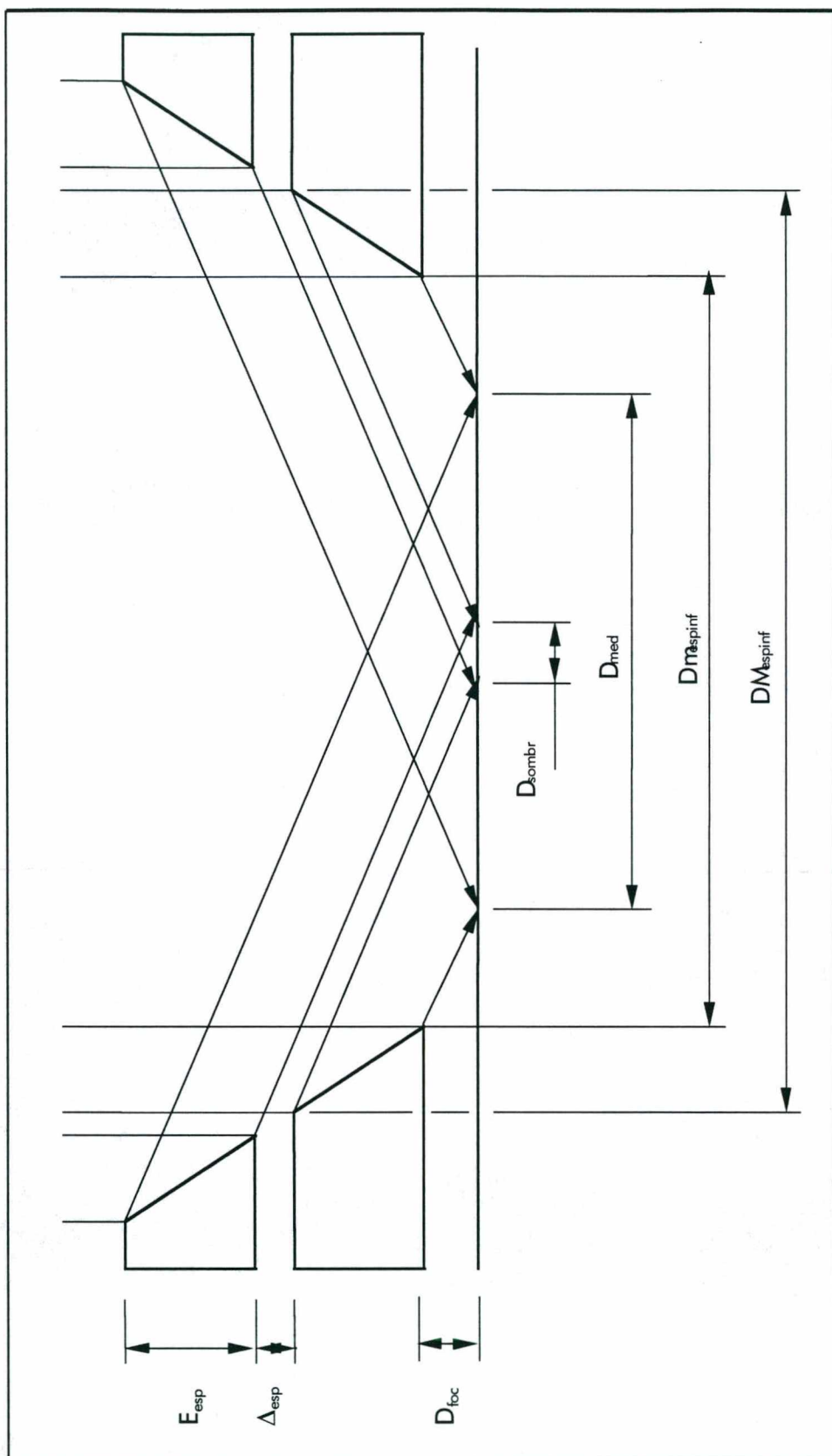


Figura 4.7 - Parâmetros que definem as dimensões do interferômetro radial

#### **4.2.5 Validação Experimental do Interferômetro**

A validação do interferômetro radial foi feita a partir da medição de microrrotações de uma peça e comparação dos resultados com um sistema de referência. O objetivo do experimento é mostrar que, para cada ponto de medição, apenas a componente radial do deslocamento é registrada pelo interferômetro. Pequenas rotações da peça em torno do eixo óptico do interferômetro não devem gerar franjas de interferência. O Anexo 1 mostra o cálculo das incertezas associadas aos resultados do experimento.

##### **4.2.5.1 Montagem Experimental**

Nas medições de deslocamentos radiais usando a holografia combinada com o interferômetro radial é possível alcançar uma incerteza máxima estimada em  $\pm 25$  nm. Considerando este valor, é recomendável que a incerteza do sistema de referência<sup>34</sup> esteja entre  $\pm 2,5$  e  $\pm 5,0$  nm. Além da restrição da pequena incerteza, deve ser possível gerar deslocamentos de rotação de no máximo  $1\mu\text{m}$  sem a superposição de translações do tipo corpo rígido ou movimentos fora do plano.

Para simular pequenas rotações, foi idealizado um dispositivo mecânico constituído de uma barra longa apoiada em um mancal tipo gume. O deslocamento é gerado por um parafuso micrométrico e medido através de um transdutor indutivo de deslocamento posicionados na extremidade da barra oposta ao eixo de rotação determinado pelo mancal. O interferômetro radial é montado de tal forma que o centro óptico fique situado no terço inicial do dispositivo, mais próximo ao centro de rotação.

A Figura 4.8 mostra, de forma esquemática, a configuração experimental utilizada.

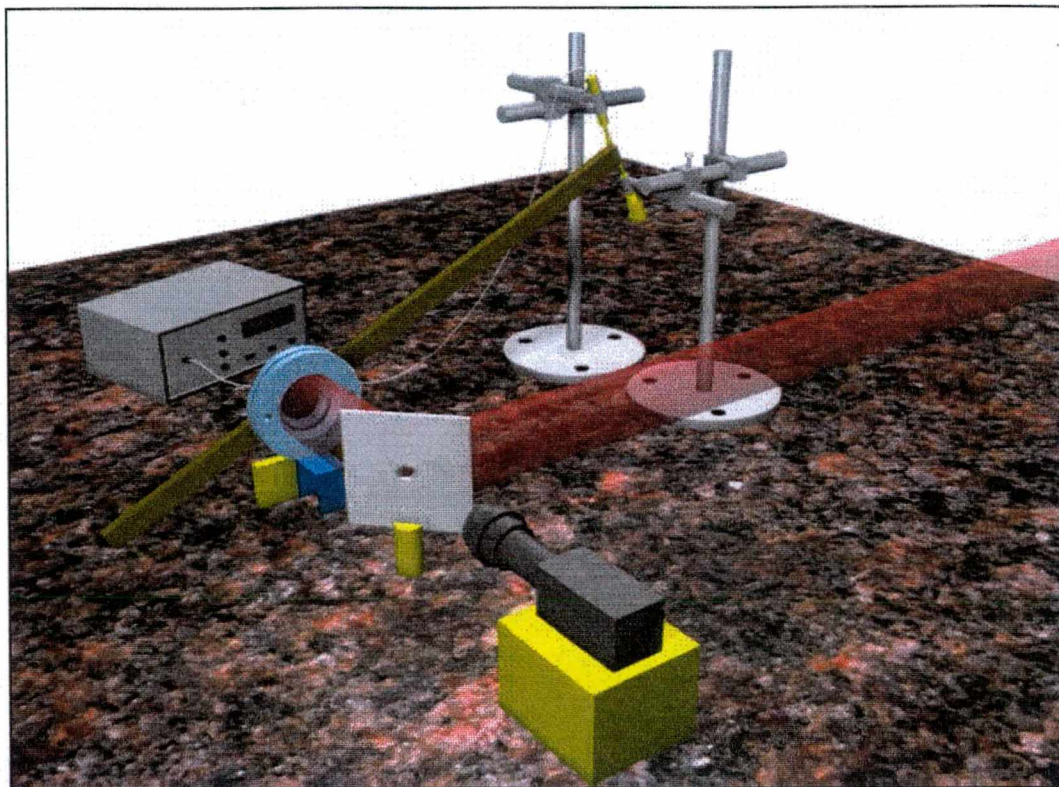
Embora seja necessário calcular o deslocamento radial ponto a ponto, este princípio permite obter resultados com incertezas inferiores a do próprio transdutor

---

<sup>34</sup> Em metrologia, é recomendável que a incerteza do sistema padrão seja de 5 a 10 vezes menor do que a incerteza do sistema de medição que está sendo avaliado.



indutivo utilizado. Considerando que não haja movimentos de translação, a incerteza máxima do deslocamento radial gerado é de  $\pm 15$  nm.



*Figura 4.8 - Detalhe sobre a montagem experimental e o sistema utilizado na geração de microrrotações*

#### **4.2.5.2 Procedimento de Execução**

Os deslocamentos radiais foram medidos em 15 pontos ao longo de três raios diferentes. As coordenadas dos pontos amostrados estão referenciados em relação a um sistema coordenado cuja origem coincide com o centro óptico do interferômetro. Para cada raio foram feitas cinco repetições. A confirmação das posições angulares absoluta e relativa da franja zero (deslocamento radial nulo) e da franja de maior ordem são indicações importantes de que somente microrrotações são introduzidas, sem a superposição de outros movimentos.

4.2.5.3 Resultados e Conclusões

Os resultados das medições para o raio de 3,5 mm são apresentados na Tabela 4.1.

Pontos Amostrados [mm]		Deslocamentos Radiais [μm]		Diferença [μm]	Repetitividade da média [μm]
X	Y	Referência	Medido		$\frac{t.s}{\sqrt{n}}$
-3,000	1,803	-0,789	-0,793	0,004	0,008
-2,750	2,165	-0,781	-0,786	0,005	0,007
-2,500	2,449	-0,765	-0,769	0,004	0,007
-2,250	2,681	-0,742	-0,745	0,003	0,007
-2,000	2,872	-0,715	-0,719	0,004	0,008
-1,750	3,031	-0,684	-0,687	0,003	0,006
-1,500	3,162	-0,650	-0,654	0,004	0,005
-1,250	3,269	-0,613	-0,616	0,003	0,007
-1,000	3,354	-0,574	-0,576	0,002	0,007
-0,750	3,419	-0,532	-0,535	0,003	0,008
-0,500	3,464	-0,488	-0,49	0,002	0,008
-0,250	3,491	-0,443	-0,445	0,002	0,008
0,000	3,500	-0,395	-0,396	0,001	0,005
0,250	3,491	-0,344	-0,346	0,002	0,005
0,500	3,464	-0,293	-0,295	0,002	0,006
0,750	3,419	-0,239	-0,242	0,003	0,007
1,000	3,354	-0,183	-0,185	0,002	0,005
1,250	3,269	-0,125	-0,127	0,002	0,006
1,500	3,162	-0,064	-0,067	0,003	0,005
1,750	3,031	0,000	-0,003	0,003	0,006
2,000	2,872	0,067	0,065	0,002	0,005
2,250	2,681	0,137	0,135	0,002	0,006
2,500	2,449	0,212	0,215	0,003	0,006
2,750	2,165	0,293	0,296	0,003	0,007
3,000	1,803	0,383	0,387	0,004	0,008

\* *t* Coeficiente t-Student considerando o número de medições e faixa de enquadramento de 95%  
*s* desvio padrão experimental  
*n<sub>med</sub>* número de medições

Tabela 4.1 - Resultados experimentais na medição de deslocamentos radiais para um raio de amostragem de 3 mm

Os resultados confirmam que, dentro do intervalo de incerteza dos deslocamentos gerados, somente a componente radial é medida e que pequenas rotações em torno do eixo óptico do interferômetro não geram franjas de interferência.

## **5. Desenvolvimento da Concepção do Módulo Aplicativo para Medição de Tensões Residuais (MATER)**

A metodologia adotada baseia-se nas técnicas de Função Síntese e QFD<sup>[68]</sup> (quality function deployment), que prevêem o detalhamento progressivo e sistemático do projeto, buscando a maximização da qualidade nas suas diferentes funções e características. Apesar de exigir um envolvimento inicial maior nas fases de planejamento e concepção, o resultado final é uma redução nos tempos e custos totais do projeto.

O trabalho inicia pela identificação das necessidades de potenciais clientes: empresas e centros de pesquisa que atuam ou utilizam serviços na área de medição de tensões. As informações obtidas nesta etapa são usadas para compor o cenário do produto, isto é, como ele se insere num contexto global, envolvendo desde aspectos ligados ao próprio usuário até o mercado. O próximo passo inclui a definição, em todos os níveis, das funções necessárias ao produto. Para executar cada função foram idealizados diferentes mecanismos ou dispositivos. Uma análise crítica destes dispositivos e suas combinações permite sugerir diferentes concepções. Estas serão otimizadas e comparadas entre si a fim de que seja selecionada a concepção mais apropriada para que, finalmente, o detalhamento do projeto seja iniciado. Cada uma destas etapas será descrita em profundidade no decorrer deste capítulo.

### **5.1 Características Desejáveis Manifestadas pelo Cliente**

Através de uma pesquisa junto a um grupo de usuários são identificadas as suas principais necessidades. Estas são descritas através de uma lista de características desejáveis, as quais representam a situação do “produto ideal”. As características e sua importância são obtidas considerando parâmetros relacionados à:

- grandeza a medir;
- aplicações típicas;
- formas de apresentação dos resultados;

- condições de operação;
- posição de medição;
- condições de acesso à região de medição;
- tempo máximo de ensaio;
- interface com o usuário;
- suprimento externo de energia;
- nível do operador.

### **5.1.1 Grandeza a Medir**

O sistema deve permitir medir o valor de tensões residuais com elevada confiabilidade, mesmo que ocorram variações ao longo da superfície medida. A região de influência deve ser pequena (não maior que 10 x 10 mm). O valor das tensões residuais ao longo da profundidade do material também deve ser quantificado.

É conveniente medir níveis de tensões residuais até níveis da tensão de escoamento do material envolvido, atingindo uma incerteza máxima de  $\pm 5\%$  da tensão de escoamento.

### **5.1.2 Aplicações Típicas**

Peças e estruturas metálicas (aços), normalmente de médias e grandes dimensões, nos quais o dispositivo possa ser rigidamente fixado. São exemplos: estruturas, tubos, placas, torres, rotores, etc.

O interesse pode recair nas proximidades de cordões de solda, de uniões entre peças e em cantos.

### **5.1.3 Resultados**

Os valores medidos das tensões principais e a incerteza de medição devem ser apresentados numericamente.

As seguintes grandezas são indispensáveis: tensões residuais principais (máxima e mínima) e direções principais e as respectivas incertezas. São desejáveis as componentes cartesianas das tensões residuais (x e y) e as deformações residuais poderiam ser também fornecidas.

Os resultados devem ser apresentados na forma gráfica (círculos de Mohr, escala de cores, e outras formas).

Resultados na forma gráfica e numérica devem ser impressos na forma de um relatório para registrar as medições efetuadas. É desejável o registro da imagem originalmente usada para as medições (mapa de fase ou de franjas). É desejável que estes resultados possam ser exportados para aplicativos WINDOWS como processadores de texto ou editores de desenhos.

#### **5.1.4 Condições de Operação**

O ambiente no qual o sistema deve operar é bastante diverso. Deve operar em temperaturas da ordem de 0 a 40 °C, na presença de vibrações típicas de ambiente industrial. A atmosfera pode estar saturada ou contaminada.

#### **5.1.5 Posição de Medição**

As peças a serem medidas poderão estar orientadas em qualquer direção (horizontal, vertical, sobrecabeça, etc).

#### **5.1.6 Portabilidade**

O sistema deve ser portátil. O cabeçote de medição deve ser pequeno, leve e robusto. Os sistemas computacional e de iluminação podem estar a uma certa distância do local de medição mas devem operar em condições também desfavoráveis.



### **5.1.7 Condições de Acesso à Região de Medição**

O sistema deve permitir medições em locais com grandes curvaturas, sejam estas convexas ou côncavas, com raios não inferiores a 100 mm.

Medições junto a obstáculos (cantos ou pequenas irregularidades da superfície da peça) quando relativamente próximos à área de medição devem ser possíveis.

### **5.1.8 Tempo de Medição**

Deve ser possível efetuar toda a instalação do sistema na peça a medir em 5 minutos.

Toda a operação de medição, incluindo a furação, obtenção das imagens e seu processamento e apresentação dos resultados deve ocorrer dentro de 30 minutos em se tratando de tensões uniformes ao longo da profundidade e 60 minutos para tensões variáveis. Eventualmente a impressão gráfica dos resultados em papel pode levar alguns minutos adicionais.

### **5.1.9 Interface com Usuário**

É importante que a interface com o usuário seja a mais amigável possível: lógica, bem organizada e com boa apresentação e representação gráfica de resultados. É desejável que o programa de execução oriente o operador durante o ensaio.

A plataforma WINDOWS deve ser empregada.

É desejável representação icônica de funções e help "on line".

### **5.1.10 Suprimento Externo**

Existe disponibilidade de eletricidade (110/220 V, 60 Hz). Ar comprimido seco, para acionamento do sistema de furação, também poderá ser utilizado.

### **5.1.11 Nível do Operador**

Após um breve treinamento (8 h), um técnico de laboratório deverá ser capaz de operar o sistema sem dificuldades.

## **5.2 Cenário do MATER**

As informações obtidas a partir da análise das características desejáveis foram usadas na composição do Cenário<sup>35</sup> em que se enquadra o MATER.

Os principais objetivos do produto são:

- a medição de tensões residuais em campo;
- permitir a medição de tensões residuais e gradientes de tensões ao longo da profundidade em peças planas e com grandes raios de curvatura (superiores a 100 mm);
- medir com incertezas comparáveis aos sistemas clássicos de ER's;

Os objetivos do projeto são:

- gerar um produto competitivo internacionalmente através de características como a possibilidade de medir gradientes de tensões, relação custo/benefício favorável e redução do tempo e dos custos do ensaio;
- oferecer um método alternativo, prático e confiável para a indústria medir tensões residuais em campo;
- geração de conhecimentos/capacitação para fazer futuros desenvolvimentos na área.

O tempo de ensaio não deve ultrapassar os 30 min na medição de tensões residuais uniformes na profundidade e os 60 min na medição de gradientes ao longo da profundidade. Em ambos os casos não se deve ter a necessidade de gastar tempo

---

<sup>35</sup> O Cenário é definido através do equilíbrio entre o idealmente desejável e o viável sob os aspectos tecnológico e econômico.

com a preparação de dispositivos de fixação do MATER na peça, ou seja, o sistema deve ser flexível o suficiente para se adaptar facilmente às peças a serem medidas sem perda de tempo.

O sistema será usado em aplicações de campo por prestadores de serviços e unidades de inspeção/manutenção, principalmente indústrias do setor metal-mecânico, na otimização de projetos e processos, análise de integridade estrutural e obtenção de dados para garantir a qualidade de componentes. Aplicações típicas envolvem peças soldadas, conformadas, fundidas, usinadas e termicamente tratadas. Pode ocorrer a superposição de plastificações localizadas.

As principais técnicas concorrentes são a extensometria, difratometria de raios X ou raios de nêutrons, métodos magneto-elásticos e ultrassom.

Comparativamente às técnicas anteriores, as vantagens do produto proposto seriam:

- possibilidade de medir com maior praticidade em campo;
- possibilidade de identificar e medir gradientes de tensão com maior facilidade;
- possibilidade de reduzir significativamente o tempo de ensaio;
- sensibilidade variável através da alteração das condições de iluminação ou diâmetro do furo;
- simplificação do processo de medição;
- calibração pouco dependente do material.

Como desvantagens, podem ser citadas as seguintes:

- o sistema é tecnologicamente mais complexo;
- custo inicial mais alto;
- não há uma “cultura” desenvolvida no mercado;
- o método utilizado é semi-destrutivo;
- podem surgir dificuldades na medição de superfícies espelhadas.

Não se conhece nenhum sistema de medição concorrente no mercado que utilize a mesma técnica ..

O tempo previsto para o desenvolvimento do sistema é de 24 meses.

### **5.3 Detalhamento das Funções e Princípios Construtivos Adotados**

O objetivo mais importante nesta etapa do projeto é tornar possível a medição de tensões residuais em campo usando a holografia. O propósito de gerar um produto vendável também não pode ser ignorado, pelo contrário, deve sempre ser considerado. No entanto, não se pretende ainda gerar um protótipo definitivo dadas às barreiras tecnológicas que devem ser identificadas e transpostas. Neste contexto, foi definida a macrofunção medir tensões residuais e as características que o produto deve apresentar para facilitar sua venda. O detalhamento da macrofunção em seus diferentes subníveis é feito na sequência.

#### **5.3.1 Medir Tensões Residuais**

Esta função está diretamente relacionada ao aspecto funcional do produto, considerando condições de preparação e operação, aquisição e processamento dos dados, cálculos e apresentação dos resultados. A função “Medir Tensões Residuais” foi dividida em:

##### **A. Obter Franjas:**

1. *Posicionar peça/dispositivo:*
  - a) Centrar furo em relação ao espelho;
  - b) Alinhar-se com a peça;
  - c) Mirar posição onde furo será executado;
  - d) Manter-se fixo em relação à peça;
  - e) Acesso à região de medição;
2. *Aliviar tensões:*
  - a) Executar furo cego com geometria apropriada;
  - b) Controlar parâmetros da furação;
  - c) Não gerar novas tensões residuais;

d) Não sujar e não alterar a superfície;

3. *Iluminar superfície a medir:*

- a) Gerar a luz;
- b) Transmitir a luz;
- c) Gerar interferência dos feixes;
- d) Apresentar sensibilidade compatível;
- e) Promover iluminação uniforme;
- f) Fornecer iluminação com intensidade adequada;

4. *Adquirir imagens:*

- a) Captar imagens;
- b) Deslocar fase;
- c) Adquirir imagens intermediárias;

5. *Ser robusto:*

- a) Resistir à perturbações do ambiente;
- b) Gerar franjas de boa qualidade;

6. *Compensar efeitos indesejáveis:*

**B. Processar Dados:**

1. *Obter dados de entrada para processamento;*

- a) Medir raio;
- b) Medir posição do furo;
- c) Entrar dados do material.

2. *Processar imagens:*

- a) Discretizar dados da imagem;
- b) Definir região a analisar;
- c) Determinar franja de ordem zero;

- d) Definir posição do anel de amostragem;
- e) Remover salto e fase.

3. *Calcular resultados:*

- a) Calcular tensões residuais;
- b) Calcular gradiente de tensões residuais ao longo da profundidade;
- c) Transformar tensão em coordenadas desejadas;

4. Compensar efeitos indesejáveis;

5. Autodetectar falhas.

**C. Apresentar Resultados:**

- 1. Visualizar na tela;
- 2. Imprimir resultados;
- 3. Exportar resultados (formatos compatíveis);

### **5.3.2 Vender**

É importante que associado ao produto existam aspectos que assegurem a sua aceitação pelo mercado. O produto deve então apresentar as seguintes características:

- Fácil de usar;
- Fácil de instalar;
- Fácil manutenção;
- Interface amigável;

- Preço competitivo;
- Tempo de medição/operação razoável;
- Estética atraente.

5.4 *Princípios Construtivos Adotados*

Para cumprir adequadamente cada função foram idealizados diferentes princípios. Através da comparação das vantagens e desvantagens inerentes a cada um deles, procurou-se definir, para cada função, um único princípio ou solução. Houve situações em que uma ou mais soluções tiveram de ser consideradas.

Nesta seção são apresentados as funções e os respectivos princípios adotados<sup>36</sup>, apontando suas vantagens e problemas.

FUNÇÃO	PRINCÍPIO	VANTAGENS	PROBLEMAS	OBSERVAÇÕES
1-Centrar furo em relação ao interferômetro radial.	Construção rígida, garantir mecanicamente a centragem furo-interferômetro radial.	Não necessita de nenhum ajuste por parte do usuário.	Pode ocorrer desgaste das partes mecânicas com o tempo.	
2-Alinhar-se com a peça	Iluminação paralela (sombras coincidentes): O sistema estará alinhado quando as sombras coincidirem. (visualizar com a câmera de TV).	Simples e seguro.	Decisão final quanto ao alinhamento cabe ao operador.  Requer que os discos sejam retirados depois de alinhar o sistema.	De acordo com a concepção construtiva, prever a existência da furadeira na região próxima ao espelho, prejudicando o posicionamento dos discos, a visualização da superfície de medição.

<sup>36</sup> Embora tivessem sido apontados vários princípios para cada função, somente o(s) princípio(s) efetivamente adotado(s) são apresentados.

<b>FUNÇÃO</b>	<b>PRINCÍPIO</b>	<b>VANTAGENS</b>	<b>PROBLEMAS</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
3-Mirar posição onde o furo será executado	Colocar mira no sistemas de discos concêntricos (coincidentes).	A solução é simples e pode ser implementada a baixo custo.		
4-Manter-se fixo em relação a peça	Dispositivo na peça usando cola <sup>(1)</sup> e/ou base magnética <sup>(2)</sup> .	(1)- Garante fixação rígida, pode ser usada em vários materiais.  (2)- Permite posicionar o dispositivo antes de executar a colagem.	(1)Requer material de consumo; tempo de cura.  (2) Fixação pouco rígida; restrições quanto ao tipo de material e sua qualidade superficial.	Base magnética serviria como um sistema complementar de fixação, facilitando ao operador no processo de colagem.
5- Acessar a região de medição	Projetar o espelho de forma que não fique junto à superfície a medir e deslocar a posição do interferômetro.	Soluções simples.	Aumenta o diâmetro de expansão do feixe.  A falta de simetria pode comprometer a estabilidade frente à vibrações.	
6-Executar furo com geometria apropriada	Usinagem à alta rotação	Procedimento já consagrado na literatura e outros dispositivos para medir tensões residuais.  Pequena introdução de novas tensões.  Boa qualidade geométrica do furo gerado.	Baixo Torque*, podendo haver parada da ferramenta durante a furação (para diâmetros maiores).  Dificuldades de usinagem em materiais duros, danificando broca ou turbina devido ao aquecimento.	



<b>FUNÇÃO</b>	<b>PRINCÍPIO</b>	<b>VANTAGENS</b>	<b>PROBLEMAS</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
7-Controlar parâmetros da furação	Batente mecânico c/ distância pré-definida, usando sistema de molas.	Sistema compacto e robusto.	Dificuldade em automatizar o processo.  Participação do operador.	
8- Manter limpa a superfície para as medições.	Jato de ar comprimido.	Processo rápido e simples.	Pode sujar espelho ou a superfície da peça, levando à perda de correção; Ar seco(isento de óleo).	
9. Gerar luz	Laser a gás fora da unidade de medição.	Redução das dimensões do cabeçote de medição.	Necessidade de uma ligação física entre a fonte e o interferômetro.	
10. Transmitir a luz	Fibra óptica single mode.	As propriedades relativas entre os raios do feixe luminoso não são alteradas.	Diminui a robustez do sistema. Perdas na transmissão.	
11. Gerar interferência	Interferômetro radial	Compacto e robusto.	Qualidade das franjas.	
12. Apresentar sensibilidade compatível	a) Diferentes diâmetros de furos  b) Iluminação divergente	a) Simplicidade  b) Alteração da sensibilidade do interferômetro	a)Pode dificultar medições localizadas.  b) Operação trabalhosa e oferece riscos ao sistema.	
13-Promover iluminação uniforme	Pintar a peça.	Não sai com o jato de ar comprimido.	Secagem muito demorada.	Não foi pesquisada a existência de uma tinta com solvente bastante volátil.

<b>FUNÇÃO</b>	<b>PRINCÍPIO</b>	<b>VANTAGENS</b>	<b>PROBLEMAS</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
13.Promover iluminação uniforme (cont.)	Revelador p/ micrografia	Secagem Rápida	Sai com leves jatos de ar	
14. Fornecer iluminação com intensidade adequada	Variar potência do laser e abertura da lente da câmera; utilizar atenuadores	Simplicidade	A avaliação da qualidade depende do operador	
15-Captar imagens	Câmera CCD	Existem modelos em miniatura. Preço.	Pontos saturados podem contaminar vários pixels.	
16- Deslocar fase	Anel Piezoelétrico	Fácil automatização. Rapidez.	Atuador é frágil (danifica-se facilmente) Requer espelho bipartido. Custo do sistema de controle	
17. Medir raio do furo	Amplificar raio do furo através de um conjunto óptico complementar e automatizar o processo através de software.	Diminuição das incertezas e maior rapidez.	A necessidade de uma segunda lente torna o processo de medição mais trabalhoso.	
18. Medir posição do furo	Via software	Rapidez.		
19. Discretizar dados da imagem	Através de software, o usuário especifica um ou vários anéis de amostragem	Rapidez.		
20.Cálculo das Tensões	Harmônicos, Mínimos Quadrados e Compensação de Drift	Processamento automatizado. Rapidez.		

<i><b>FUNÇÃO</b></i>	<i><b>PRINCÍPIO</b></i>	<i><b>VANTAGENS</b></i>	<i><b>PROBLEMAS</b></i>	<i><b>OBSERVAÇÕES</b></i>
21. Calcular Gradiente de tensão na profundidade	Furação incremental e algoritmos específicos de processamento.	Informações disponíveis na literatura.	Aumenta o tempo de medição, tornando o processo mais susceptível à influências externas.	
22. Compensar efeitos indesejáveis	Via software			

## **6. Modelamento e Simulação da Concepção do MATER**

Técnicas ópticas já vêm sendo utilizadas na medição de tensões residuais há vários anos, embora sua aplicação ainda permaneça restrita aos ambientes controlados dos laboratórios.

Um dos maiores limitantes à aplicação destas técnicas, especialmente a holografia eletrônica, em ambiente de campo, é a complexidade das montagens e a sua extrema sensibilidade a fatores ambientais, tais como vibrações mecânicas, correntes de ar e gradientes térmicos.

O interferômetro radial apresentado neste trabalho, apesar de sua concepção robusta, por si só não é suficiente para garantir um sistema que apresente comportamento funcional e metrológico adequado às condições severas de utilização em campo. É preciso desenvolver um dispositivo robusto e compacto que integre os diferentes componentes ópticos e que permita uma fixação eficiente do sistema de medição à superfície da peça que se pretende medir.

A montagem dos elementos ópticos numa estrutura leve e rígida, tipo monobloco, é o primeiro passo no sentido de obter um sistema de medição robusto. Quanto à fixação, esta deve garantir que não ocorram movimentos relativos entre o monobloco e a superfície da peça.

Um programa de simulação numérica foi desenvolvido a fim de avaliar quantitativamente a influência de vibrações e choques mecânicos sobre a estabilidade das franjas de interferência obtidas com o interferômetro radial.

Paralelamente, a partir dos resultados das simulações, foi desenvolvido e fabricado um protótipo com os objetivos de testar diferentes formas de fixação e avaliar experimentalmente o comportamento do sistema quando submetido às condições típicas de utilização em campo. Diferentes modos e amplitudes de vibração, além de choques mecânicos, foram gerados através de uma bancada de ensaios e a estabilidade das franjas de interferência foi avaliada.

Os resultados obtidos apontam para a viabilidade da aplicação da holografia combinada com o interferômetro radial, desde que tomados alguns cuidados importantes.

## 6.1 *Vibrações: sua Influência sobre as Medições com Holografia e Técnicas para Minimizar seus Efeitos*

A influência de vibrações mecânicas, percebida através de movimentos relativos entre os componentes ópticos ou destes em relação à superfície da peça que está sendo medida, pode comprometer toda a tarefa de medição.

Vibrações introduzem efeitos característicos como a diminuição do contraste e a instabilidade das franjas ou ainda flutuações no nível de fundo do padrão de interferência. Esta última situação pode levar à uma medição afetada por erros graves, quando não percebida e devidamente compensada através de algoritmos adequados de processamento.

A forma pela qual os efeitos de vibrações são notados depende fundamentalmente da razão entre a velocidade de aquisição das imagens necessárias ao processamento da medição e a frequência das vibrações.

O efeito de vibrações com frequências superiores à frequência de aquisição da câmera de vídeo utilizada é a diminuição do contraste das franjas de interferência.

Para amplitudes de vibração inferiores ao comprimento de onda da luz usada na medição, o contraste das franjas pode ser determinado, com boa aproximação, através da equação:<sup>[69]</sup>

$$\Delta V \approx 1 - \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2 \quad (6.1)$$

onde:

$\Delta V$  é a diminuição no contraste [ adimensional]

$a$  é a amplitude de vibração [  $\mu\text{m}$  ]

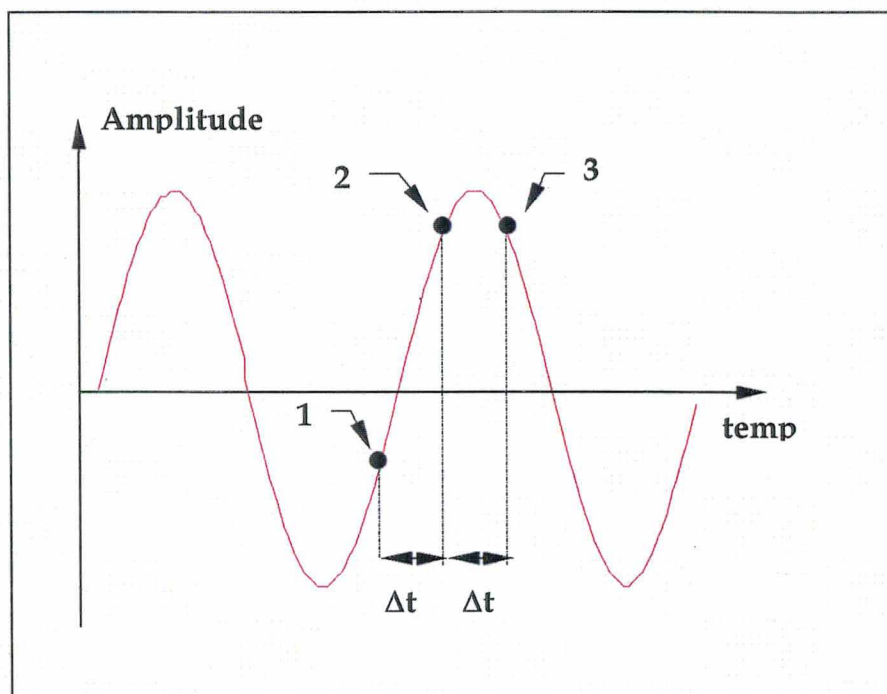
$\lambda$  é o comprimento de onda da luz [  $\mu\text{m}$  ]

Supondo iluminação com laser He-Ne (0,633  $\mu\text{m}$ ) e uma queda no contraste de 20% ( $\Delta V = 0,8$ ), a máxima amplitude de vibração admitida seria de 0,28  $\mu\text{m}$ .

Enquanto que vibrações de alta frequência diminuem o contraste das franjas de interferência, vibrações de baixa frequência podem eliminá-las completamente. Isto irá depender da parcela da amplitude máxima do deslocamento vibratório medida durante

o intervalo de exposição.

Erros aleatórios significativos também podem ser introduzidos, principalmente durante o processo de deslocamento de fase. Os efeitos de vibrações de baixa frequência são minimizados quanto mais próximo aos extremos do movimento oscilatório forem adquiridas as imagens<sup>37</sup>, conforme apresentado na Figura 6.1.



*Figura 6.1 - Influência do ponto de aquisição*

Descrever o efeito das vibrações de baixa frequência não é tarefa fácil. Para simplificação da análise, considerar-se-á que o movimento vibratório seja harmônico, descrito por  $x(t) = D \cos\left(\frac{2\pi}{T_o} t\right)$  e que a aquisição ocorra a qualquer tempo do período de oscilação com a mesma probabilidade. Nesta condição o “deslocamento amostrado” durante o intervalo de exposição é dado por<sup>[70]</sup>:

<sup>37</sup> Embora defasados do mesmo intervalo de tempo, a diferença na amplitude entre os pontos 1 e 2 é muito mais significativa do que a diferença entre os pontos 2 e 3.

$$d_{amost} = 3,57D \left( \frac{te}{T_o} \right) \quad (6.2)$$

onde:

$d_{amost}$  é o deslocamento amostrado [ $\mu\text{m}$ ]

$D$  é a amplitude máxima de deslocamento [ $\mu\text{m}$ ]

$te$  é o tempo de exposição [ms]

$T_o$  é o período do movimento oscilatório [ms].

Nestas condições, a intensidade amostrada durante o período de exposição pela câmera de vídeo é dada por:

$$I_{amost} = I_o \left[ 1 + \gamma \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} d \right) \cos \varphi \right] \quad (6.3)$$

onde:

$I_o$  é a intensidade do nível de fundo [níveis de cinza]

$\gamma$  é um parâmetro dependente do contraste das franjas e do tamanho do pixel, representando a modulação [adimensional]

$\varphi$  é o ângulo de fase, considerando que o movimento vibratório não introduza distorções de forma [°]

De acordo com a equação 6.3 quando o fator  $d$  for igual a metade do comprimento de onda da luz, o termo da modulação desaparece e uma imagem cinza é adquirida. Desta forma, o tempo de aquisição deve ser tal que o deslocamento  $d$  amostrado seja muito menor do que metade do comprimento de onda do laser utilizado na medição.

As técnicas tradicionais de deslocamento de fase não podem ser utilizadas porque o período para a aquisição das imagens correspondentes ao número de passos utilizado é muito grande comparado à frequência das vibrações. O período de aquisição é limitado por:

- a velocidade de leitura correspondente ao “esvaziamento” dos pixels da câmera (*readout time*);
- o tempo mínimo de integração para minimizar os efeitos do ruído eletrônico da



câmera de vídeo;

- o tempo de acomodação (*settling time*) do dispositivo de deslocamento de fase, crítico em transdutores mecânicos;
- do número de passos utilizados no deslocamento de fase.

Quando são utilizados algoritmos em que o deslocamento de fase é implementado em três passos ou menos, a aquisição é limitada pelo tempo de acomodação do transdutor de deslocamento piezoelétrico ou, em casos extremos, até pelo tempo de *readout*.

Wizinowich<sup>[71]</sup> e Colucci<sup>[72]</sup> propõem um sistema baseado num algoritmo de deslocamento de fase em três passos, onde somente dois interferogramas têm uma dependência crítica do tempo de aquisição. Utilizando uma particularidade da arquitetura das câmeras pzt com estrutura interline, duas imagens diferentes podem ser adquiridas e armazenadas para então serem transferidas para a placa de processamento de imagens. Desta forma o tempo de *readout* não é crítico. Para permitir um deslocamento de fase rápido o suficiente, este é implementado através de modulação da frequência do laser através de efeito Doppler ou por um modulador opto-acústico. A sincronização entre os tempos de aquisição e deslocamento é uma condição crítica da qual depende o bom desempenho da técnica.

Mellozi<sup>[73]</sup> et al. apresentam um interferômetro onde a fase é obtida a partir de um único interferograma utilizando a técnica de deslocamento de fase pela introdução de frequência portadora (*spatial carrier phase-shifting* - SCPS). O interferograma é adquirido dentro de um intervalo de tempo inferior a 0,1 ms.

Problemas comuns às duas técnicas citadas são:

- a elevada sensibilidade a ruído, principalmente quando há regiões escuras ou onde a qualidade da imagem é ruim;
- a necessidade de câmeras bastante sensíveis, com elevada relação sinal/ruído e ajuste de tempo de exposição;
- fonte de iluminação potente.

A busca por interferômetros robustos, principalmente aqueles do tipo *common-path* é uma alternativa que vêm sendo bastante pesquisada. Embora técnicas adequadas de deslocamento de fase e processamento não estejam disponíveis, o uso



de algoritmos baseados em análise de Fourier permitem obter resultados com menores incertezas. A qualidade das franjas de interferência obtidas tem sido o principal limitante até o momento.

Sistemas de estabilização ativa também têm sido utilizados em laboratório, embora ainda sejam complexos, caros e pouco portáteis.

## 6.2 Simulação Numérica da Estabilidade

Um programa de simulação foi desenvolvido com o objetivo de identificar movimentos relativos críticos dos componentes ópticos entre si e destes em relação à superfície da peça a medir. Utilizando a técnica de *ray tracing* e matemática vetorial, é possível introduzir diferentes tipos de movimentos dos componentes (translações e movimentos angulares) e determinar quantitativamente a alteração de caminho óptico entre cada par de raios que interfere junto à superfície da peça.

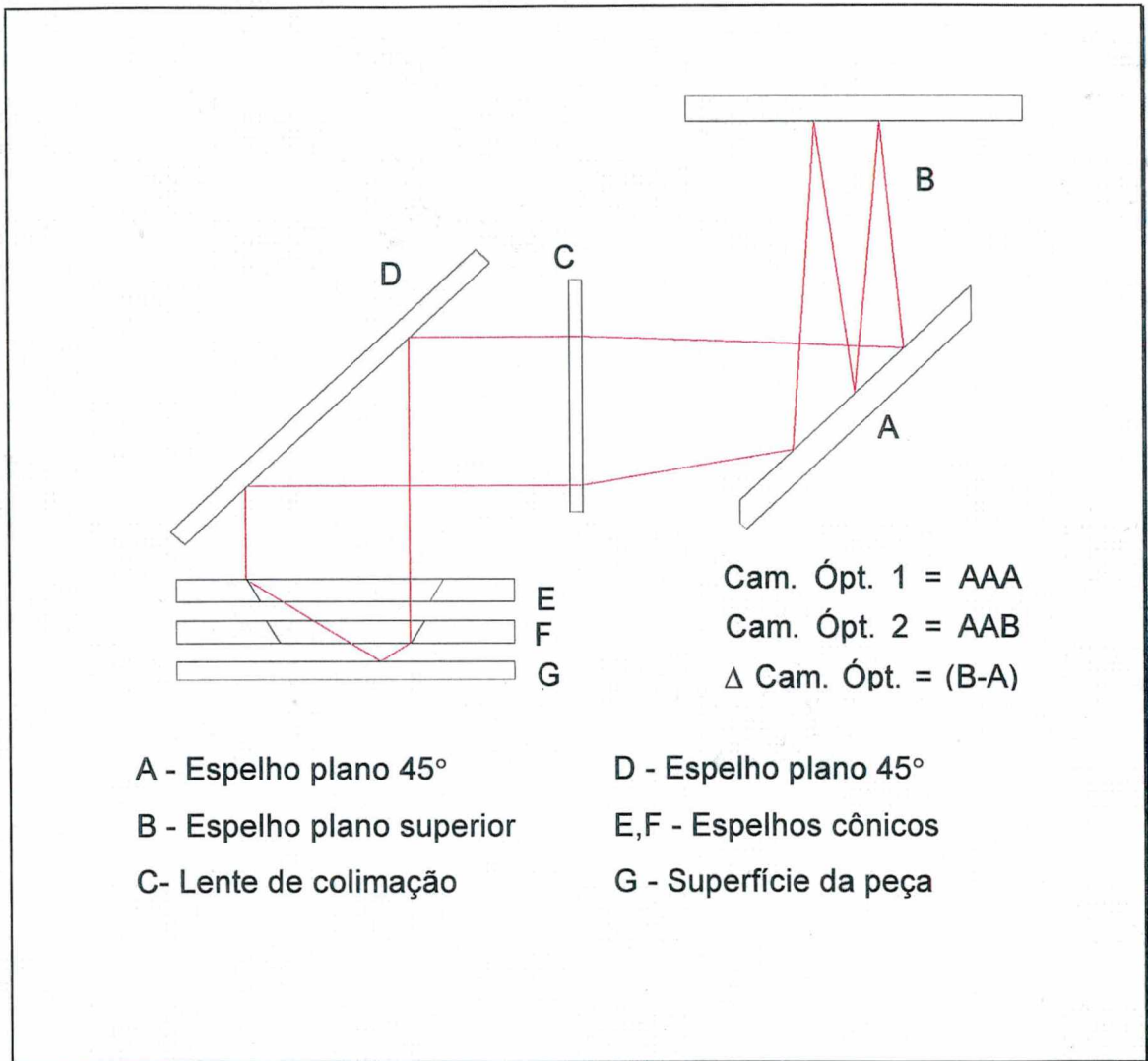
A Figura 6.2 mostra a tela principal do programa de simulação, identificando de forma esquemática cada um dos elementos ópticos que compõem o conjunto de iluminação.

Como principais fontes de erros podem ser apontadas as seguintes:

- movimentos angulares dos espelhos planos (identificados pelas letras A, B e D na Figura 6.2);
- movimentos relativos entre elementos ópticos que causem mudanças no caminho de expansão da luz;
- movimentos relativos entre o sistema e a peça (indicada pela letra G na Figura 6.2) num plano perpendicular ao eixo óptico do interferômetro (E e F na Figura 6.2).

Pequenos deslocamentos do sistema de medição em planos que passam pelo eixo óptico do interferômetro são menos críticos.

Os movimentos mais difíceis de serem impedidos são do interferômetro em relação à peça a medir. Deslocamentos dos componentes ópticos internos podem ser evitados através de uma estrutura suficientemente rígida e da fixação com cola dos componentes ópticos.



*Figura 6.2 - Tela principal do programa de simulação, identificando os componentes ópticos do sistema*

Os resultados apresentados a seguir representam, através das mudanças de caminho óptico, o efeito de movimentos relativos do conjunto de iluminação.

Considerando a estabilidade das franjas de interferência, alterações de caminho óptico superiores a um décimo do comprimento de onda do laser utilizado<sup>38</sup> já podem ser consideradas significativas.

A disposição dos componentes ópticos segue o esquema da Figura 6.2. Nesta simulação foi usada uma lente de colimação com comprimento de foco de 163 mm e

<sup>38</sup> Para laser He-Ne ( $\lambda=632,8 \text{ nm}$ ), alterações de caminhos ópticos superiores a 63 nm.

uma distância interferômetro-peça de 3mm. Os deslocamentos simulados correspondem a valores muito superiores aos que podem ocorrer em situações de uso comum<sup>39</sup>.

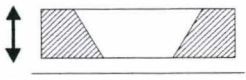
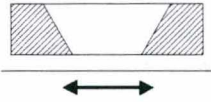
Movimento relativo da peça em relação ao interferômetro							
Mov. vertical relativo de + 1mm				Mov. horizontal relativo de + 1mm			
							
x	y	$\Delta$ caminho óptico[ $\mu\text{m}$ ]	Conclusão	x	y	$\Delta$ caminho óptico[ $\mu\text{m}$ ]	Conclusão
-5	0	-10,9	Movimento não crítico	-5	0	-1701	Movimento crítico
-4	0	-8,7		-4	0	-1701	
-3	0	-6,5		-3	0	-1701	
-2	0	-4,4		-2	0	-1701	
-1	0	-2,2		-1	0	-1701	
0	0	0		0	0	-1701	
1	0	2,2		1	0	-1701	
2	0	4,4		2	0	-1701	
3	0	6,5		3	0	-1701	
4	0	8,7		4	0	-1701	
5	0	10,9		5	0	-1701	

Tabela 6.1 - Mudanças de caminho óptico em função de movimentos de translação entre o interferômetro e a peça

Os resultados da Tabela 6.1 mostram que o movimento relativo vertical entre o

<sup>39</sup> Considerando uma qualidade de fixação do interferômetro à peça e dos componentes ópticos internos facilmente obténível na prática.



interferômetro (indicado pela letra E e F na Figura 6.2) e a peça (indicado por G na Figura 6.2) não é crítico.

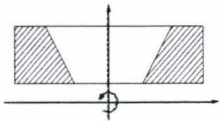
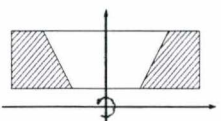
Movimento relativo da peça em relação ao interferômetro							
Giro em torno da origem de 1° 				Giro em torno da origem de 10° 			
x	y	$\Delta$ caminho óptico[ $\mu$ m]	Conclusão	x	y	$\Delta$ caminho óptico[ $\mu$ m]	Conclusão
-5	0	-0,3	<b>Movimento não crítico (Amplitude)</b>	-5	0	-119,9	<b>Movimento crítico (Amplitude)</b>
-4	0	-0,4		-4	0	-97,4	
-3	0	-0,4		-3	0	-74,2	
-2	0	-0,4		-2	0	-50,2	
-1	0	-0,2		-1	0	-25,5	
0	0	0		0	0	0	
1	0	0,3		1	0	26,2	
2	0	0,7		2	0	53,2	
3	0	1,1		3	0	80,9	
4	0	1,6		4	0	109,3	
5	0	2,2		5	0	138,5	

Tabela 6.2 - Diferenças de caminho óptico introduzidas pela rotação do interferômetro em relação à peça

Conforme os resultados da Tabela 6.2, movimentos relativos de rotação da peça em relação ao interferômetro não são críticos. Mesmo em condições adversas, rotações da ordem de 1° são bastante difíceis de ocorrerem.

Por outro lado, movimentos relativos num plano perpendicular ao eixo óptico do interferômetro introduzem diferenças significativas de caminho óptico.



Movimentos Relativos dos Componentes do Interferômetro							
Espelho Superior							
Movimento vertical de + 1 mm				Movimento angular de + 10°			
							
x	y	$\Delta$ caminho óptico[ $\mu\text{m}$ ]	Conclusão	x	y	$\Delta$ caminho óptico[ $\mu\text{m}$ ]	Conclusão
-5	0	2,4	<b>Movimento não crítico</b>	-5	0	176,4	<b>Movimento crítico</b>
-4	0	1,9		-4	0	176,4	
-3	0	1,4		-3	0	176,4	
-2	0	1,0		-2	0	176,4	
-1	0	0,5		-1	0	176,4	
0	0	0		0	0	176,4	
1	0	-0,5		1	0	176,4	
2	0	-1,0		2	0	176,4	
3	0	-1,4		3	0	176,4	
4	0	-1,9		4	0	176,4	
5	0	-2,4		5	0	176,4	

Tabela 6.3 - Diferenças de caminho óptico introduzidas por movimentos do espelho superior

Os resultados da Tabela 6.3 apontam para a importância de um sistema de fixação do sistema à peça a medir suficientemente robusto para evitar o movimento relativo horizontal entre o espelho e a superfície medida. Isto significa que além de impedir movimentos relativos entre os componentes ópticos é preciso desenvolver uma fixação que garanta que os movimentos do sistema de medição como um todo em relação à superfície da peça se mantenham abaixo dos valores críticos identificados nesta simulação.

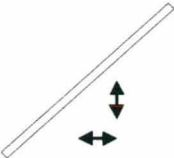
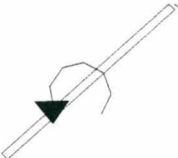
Movimentos Relativos dos Componentes do Interferômetro							
Espelho Plano Furado Inclinado em 45°							
Movi. verticais ou horizontais de + 1mm 				Movimento angular de + 1° 			
x	y	Δ caminho óptico[μm]	Conclusão	x	y	Δ caminho óptico[μm]	Conclusão
-5	0	62,8	Movimento menos crítico	-5	0	-294,5	Movimento muito crítico
-4	0	62,8		-4	0	-294,7	
-3	0	62,8		-3	0	-294,8	
-2	0	62,8		-2	0	-294,9	
-1	0	62,8		-1	0	-295	
0	0	62,8		0	0	-295,1	
1	0	62,8		1	0	-295,1	
2	0	62,8		2	0	-295,2	
3	0	62,8		3	0	-295,3	
4	0	62,8		4	0	-295,3	
5	0	62,8		5	0	-295,3	

Tabela 6.4 - Diferenças de caminho óptico introduzidas por movimentos do espelho plano inclinado em 45°

Os resultados da Tabela 6.4 mostram que movimentos relativos verticais ou horizontais do espelho plano inclinado em 45° (indicado pela letra D na Figura 6.2) não introduzem alterações significativas de caminho óptico, embora movimentos da ordem de grandeza dos simulados devem ser evitados. Movimentos de rotação deste espelho são críticos.

Os resultados obtidos nestas simulações trazem informações importantes,



identificando movimentos críticos e componentes mais susceptíveis à influência de vibrações.

### **6.3 Aspectos Construtivos do Protótipo**

Este primeiro protótipo foi desenvolvido considerando os resultados obtidos através de simulação, com o objetivo de avaliar experimentalmente a influência de vibrações sobre a estabilidade das franjas de interferência. O protótipo deve atender aos seguintes requisitos:

- os componentes da óptica de iluminação devem ser montados numa estrutura tipo monobloco, leve e robusta;
- permitir ajuste de altura da câmera CCD;
- possibilitar o teste de diferentes tipos de fixação: parafusos, sapatas articuladas e magnética.

#### **6.3.1 Estrutura Monobloco**

No monobloco é integrada a óptica de iluminação apresentada na Figura 6.2. Esta estrutura deve ser robusta no sentido de garantir uma fixação rígida dos componentes ópticos do sistema de medição, de forma que vibrações mecânicas transmitidas através da superfície da peça não causem movimentos relativos destes elementos entre si.

A estrutura foi fabricada a partir de uma liga de alumínio aeronáutico, comercialmente conhecida por USINAL 201. Todos os componentes ópticos são fixados à estrutura através de cola à base de cianoacrilato. O monobloco será fixado à uma superfície plana<sup>40</sup> através de 3 parafusos M5. A Figura 6.3 mostra os detalhes construtivos do conjunto. Conforme será visto adiante, o sistema pode ser fixado à peça a medir de várias formas

---

<sup>40</sup> Esta superfície plana pode ser a superfície da peça a ser medida ou uma base intermediária na qual serão integrados elementos de fixação auxiliares que permitem fixação em superfícies curvas.

- diretamente por parafusos;
- ou através de uma placa intermediária que permite acoplar sapatas articuladas ou bases magnéticas. As sapatas são acopladas à placa intermediária através de parafuso e porca, enquanto que a fixação à superfície da peça é feita usando cola de cianoacrilato.

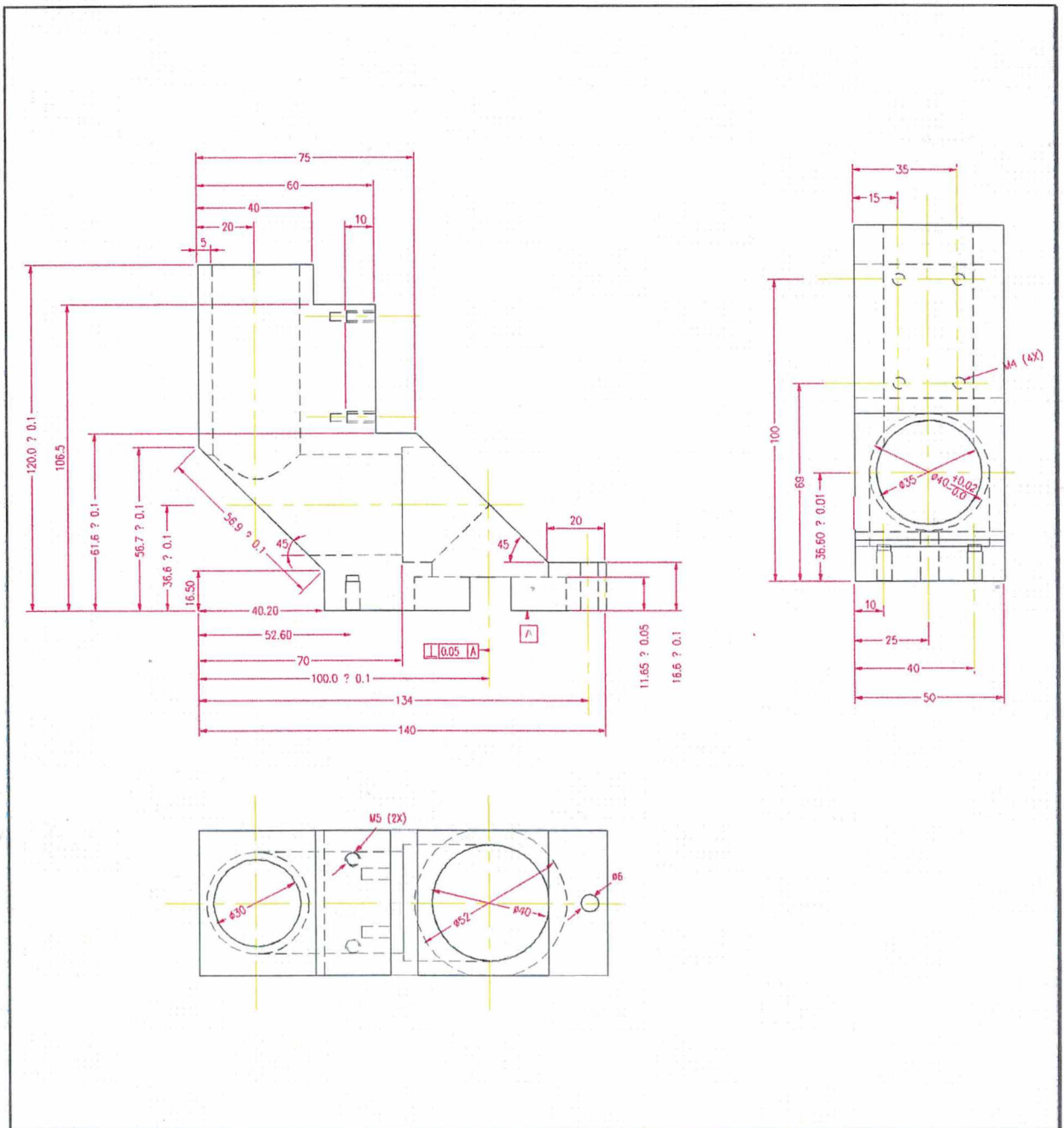


Figura 6.3 - Detalhe da estrutura monobloco que integra os diversos elementos ópticos



### 6.3.2 Suporte da Câmera CCD

A câmera CCD é montada em um suporte que permite ajuste de altura, que por sua vez é fixado rigidamente ao monobloco através de parafusos. A Figura 6.4 mostra o suporte da câmera.

A flexibilidade na movimentação da câmera é importante a fim de que se consiga combinar ampliação e focalização adequadas da região de medição.

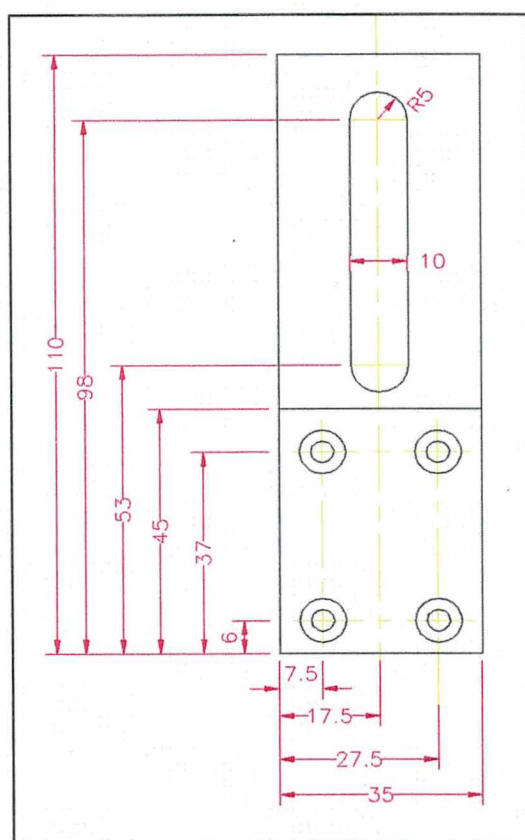


Figura 6.4 - Suporte ajustável da câmera CCD

### 6.3.3 Placa Intermediária para Montagem de Elementos Auxiliares de Fixação

Uma placa intermediária, rigidamente fixada ao monobloco através de parafusos, permite a integração de três elementos de fixação auxiliares. Estes elementos podem ser sapatas articuladas e com ajuste de altura. A fixação destas

sapatas à superfície da peça a medir pode ser feita através de cola à base de cianocrilato ou por meio de imãs.

Neste protótipo serão utilizadas as sapatas disponíveis no sistema de medição de tensões residuais RS 200 da empresa MicroMeasurements Group. Estas sapatas consistem de uma haste cilíndrica roscada, com uma das extremidades ligada a uma esfera. Através deste sistema é possível ajustar, de forma independente, a altura e a inclinação de cada um dos elementos de fixação. Esta característica confere flexibilidade ao sistema, considerando a fixação em superfícies não planas. Na Figura 6.5, os furos identificados por 1, 2 e 3 são usados para fixação do monobloco, enquanto que através dos furos 4, 5 e 6 serão acopladas as sapatas articuladas.

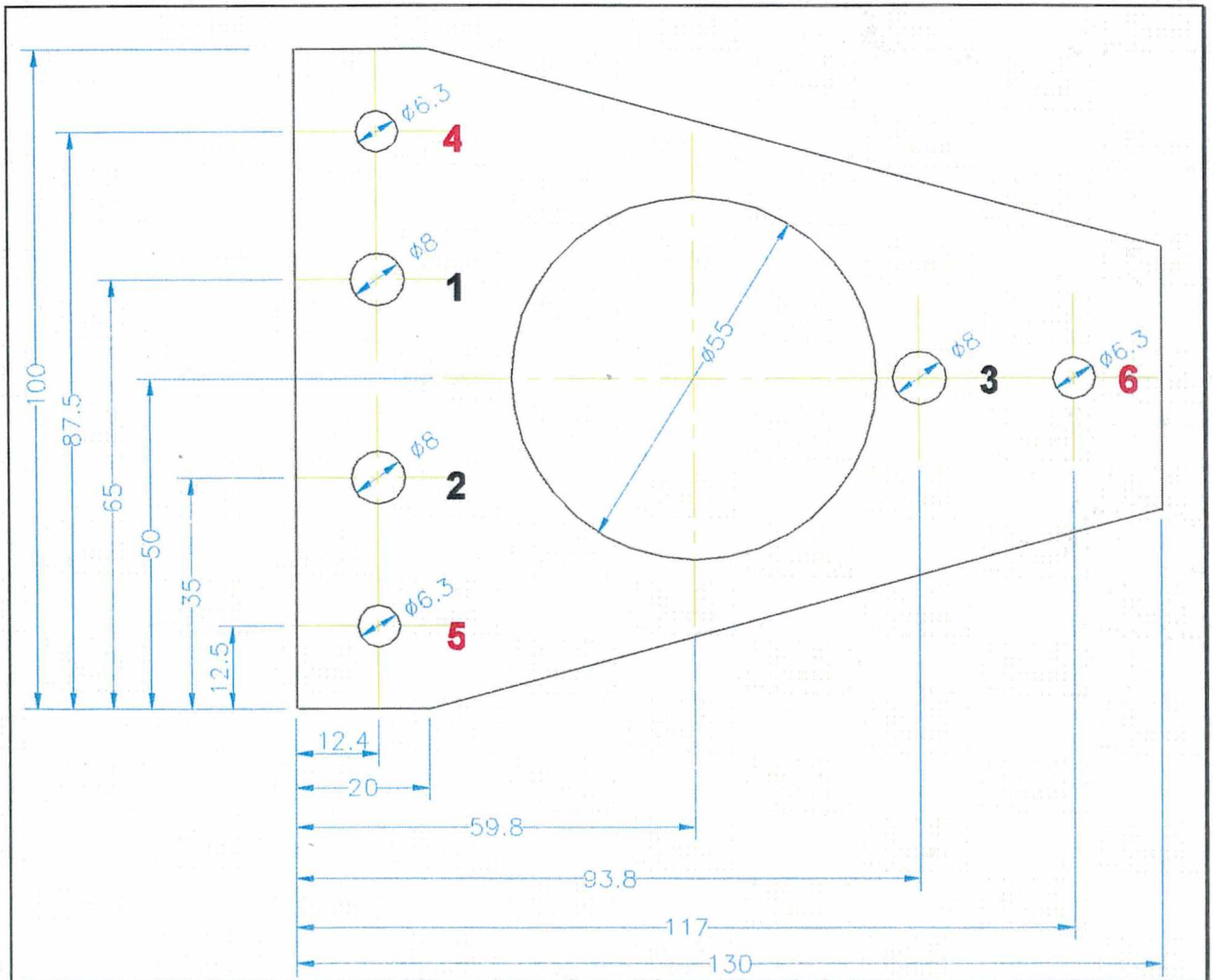


Figura 6.5 - Placa intermediária para acoplamento das sapatas de fixação

Um segundo conceito, utilizando bases magnéticas acionadas mecanicamente também é utilizado.

## **6.4 Avaliação Experimental do Protótipo**

### **6.4.1 Objetivos**

Nesta etapa se tem como objetivo avaliar experimentalmente a estabilidade das franjas obtidas com o interferômetro radial frente à vibrações típicas encontradas no ambiente em que o produto será utilizado, considerando os modos críticos de vibração identificados através de análises teóricas.

A análise é feita considerando vibrações da peça a medir em relação ao sistema de medição, vibrações dos componentes ópticos do protótipo e susceptibilidade a choques mecânicos.

Também é propósito deste experimento verificar a rigidez e a praticidade do sistema de fixação à peça a medir, considerando diferentes princípios/técnicas (parafusos, cola, magnético ou ambos) e a qualidade (estabilidade) das franjas na presença de vibrações.

### **6.4.2 Infra-estrutura de Experimentação**

A fim de analisar a estabilidade do protótipo frente à vibrações é necessária uma bancada especial que permita simular de forma controlada diferentes modos de vibração da peça a medir.

Diante da dificuldade de deslocar todo sistema de medição para um ambiente que apresentasse níveis de vibrações típicos de ambiente de campo, optou-se por fazer o experimento junto à bancada óptica disponível no Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (Labmetro).

A infra-estrutura básica para execução do ensaio consiste de:

- sistema de simulação de vibrações (bancada especialmente desenvolvida



para gerar vibrações com diferentes amplitudes, modos e frequências);

- sistema de medição de vibrações;
- estação holográfica e protótipo de testes.

#### **6.4.2.1 Sistema de Simulação de Vibrações**

Foi desenvolvida uma bancada que permite simular diferentes movimentos de vibração, variando de frequências entre 0 e 300 Hz, embora vibrações típicas de campo não ultrapassem os 200 Hz .

Este sistema é composto pelos seguintes componentes:

- base metálica apoiada sobre quatro molas helicoidais. Dimensões: 470 x 320 x 13 mm.
- 3 bobinas e núcleos ferromagnéticos;
- gerador de funções Modelo Hewlett-Packard 3311A.
- amplificador de tensão Hewlett-Packard Modelo 6826A;
- bases magnéticas acionadas mecanicamente.

#### **6.4.2.2 Sistema de Medição de Vibrações**

A fim de monitorar os níveis de vibrações introduzidos, foram acoplados acelerômetros piezoelétricos no protótipo de teste e na própria base vibratória.

Os seguintes elementos compõem o sistema de medição de vibrações:

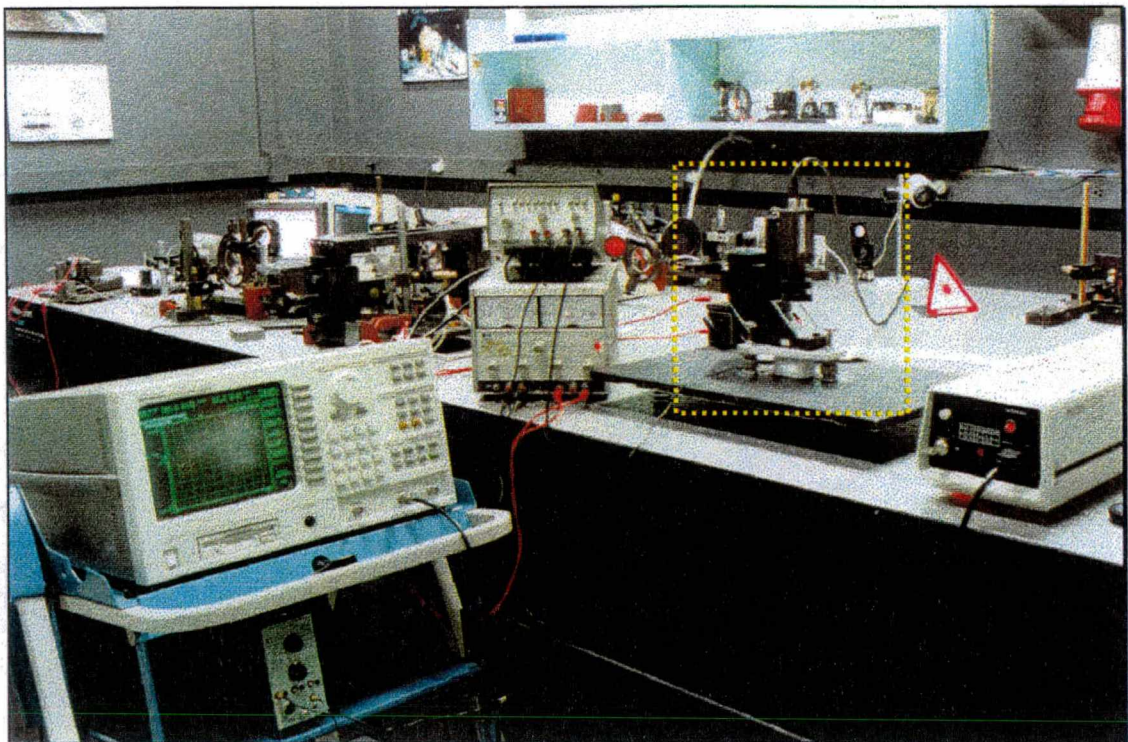
- 2 acelerômetros piezoelétricos Brüel & Kjaer modelo 4339 e acessórios de montagem;
- pré-amplificador Brüel & Kjaer;
- analisador de sinais dinâmicos Hewlett-Packard modelo 35665A.

#### **6.4.2.3 Estação Holográfica e Protótipo de Testes**

Além do protótipo experimental, alguns elementos do sistema conhecido por

Estação Holográfica<sup>[74]</sup> compõem o conjunto ensaiado. Os principais componentes deste conjunto são:

- placa de aquisição e processamento de imagens (Data Translation DT2868)
- software de processamento (sinthe 3.0)
- laser He-Ne 35 mW Spectra-Physics Modelo 127;
- protótipo para teste (estrutura monobloco, suporte de fixação da câmera CCD ao monobloco, placa intermediária para acoplamento das sapatas de fixação do monobloco à superfície da peça a medir, fibra óptica, ótica de expansão e colimação, interferômetro radial e diferentes estruturas de fixação do sistema à peça: parafusos, sapatas articuladas e bases magnéticas.
- câmera CCD compacta Hitachi KP-M1(sensor ccd 2/3").



*Figura 6.6 - Bancada utilizada nos ensaios<sup>41</sup>*

<sup>41</sup> O sistema de medição (cabeçote) está delimitado na Figura através de um retângulo tracejado. Os demais componentes fazem parte da instrumentação de simulação e medição de vibrações.



A Figura 6.6 mostra a bancada utilizada nos ensaios, destacando a instrumentação para geração e medição de vibrações.

### **6.4.3 Procedimento de Ensaio**

O procedimento de ensaio consiste em:

- simular diferentes modos de vibração e avaliar qualitativamente a estabilidade das franjas;
- simular choques mecânicos e avaliar qualitativamente da estabilidade das franjas;
- avaliar qualitativamente a rigidez dos componentes internos através da excitação do sistema com frequências elevadas.

#### **6.4.3.1 Simulação de Diferentes Modos de Vibração e Avaliação da Estabilidade das Franjas**

Vibrações são geradas através de uma fonte externa e manualmente, se necessário. A sensibilidade do sistema foi avaliada gerando movimentos angulares da base vibratória e vibrações em planos paralelos e ortogonais ao eixo óptico do interferômetro radial. A fixação das fontes de excitação em diferentes pontos sobre a base permite gerar vibrações em diferentes modos de vibração. A frequência do sinal é determinada pelo gerador de funções, enquanto que a amplitude é função do ganho selecionado no amplificador.

A simulação segue o seguinte procedimento:

- gerar de 3 a 5 franjas de corpo rígido;
- gerar um sinal entre 2 e 8 Hz e ajustar o nível de amplificação;
- assegurar-se de que o protótipo experimental está corretamente acoplado à base metálica do sistema de simulação de vibrações (observando se o padrão de franjas se mantém);
- ligar o amplificador e observar a qualidade das franjas

- anotar os resultados (qualidade e estabilidade das franjas)
- repetir o procedimento<sup>42</sup> por, no mínimo, duas vezes.

O procedimento é repetido para as seguintes faixas de frequência (seleciona-se um valor dentro de cada faixa): 15 a 40 Hz, 45 a 70 Hz, 75 a 100 Hz, 105 a 150 Hz , 155 a 200 Hz.

Avaliadas estas faixas de frequência. Todos os quatro modos críticos de vibração são avaliados (horizontal com torção, vertical e vertical com rotação), considerando estas faixas de frequência.

#### **6.4.3.2 Simular choques mecânicos e avaliar as franjas**

A partir de um martelo de borracha são gerados pequenos choques mecânicos.

O procedimento consiste em aplicar batidas com intensidade variável ao longo da superfície exposta do protótipo.

A intensidade das batidas era aumentada, inicialmente, até o ponto em que surgissem novas franjas de corpo rígido e, finalmente, perda de correlação ou redução significativa na qualidade do mapa de franjas inicial. Todo o procedimento é qualitativo.

#### **6.4.3.3 Avaliar rigidez dos componentes internos (movimentos relativos entre componentes)**

Golpes leves de um martelo metálico com massa de 200 g com a base do sistema de simulação de vibrações permitem gerar excitações em altas frequências. Embora as amplitudes de vibração sejam pequenas, é possível avaliar a rigidez dos componentes internos.

A avaliação da estabilidade das franjas é qualitativa.

---

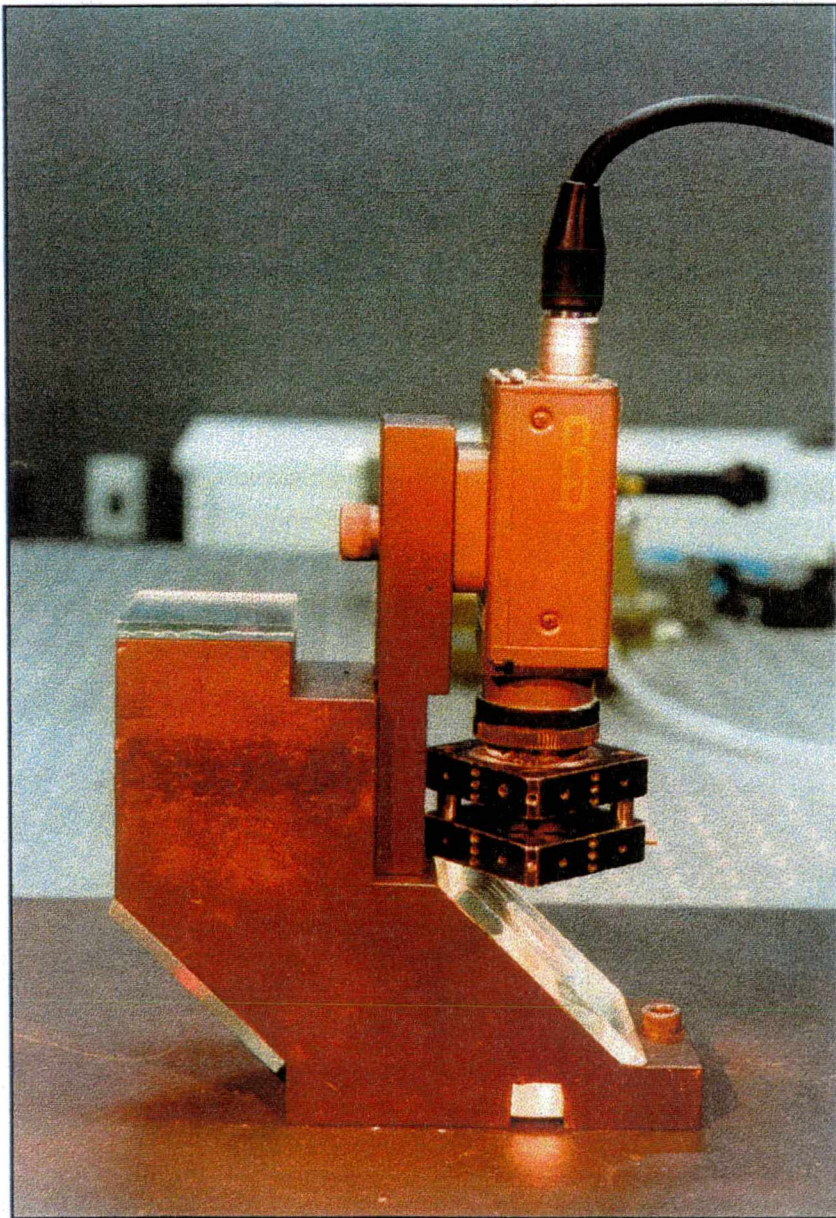
<sup>42</sup> O aumento do número de ciclos além do valor determinado depende da repetitividade dos resultados dos três primeiros ciclos.



#### **6.4.4 Análise dos Resultados**

##### **6.4.4.1 Fixação Rígida à Peça Através de Parafusos**

O protótipo foi inicialmente fixado rigidamente à uma superfície plana através de três parafusos.



*Figura 6.7 - Detalhe do protótipo fixo à mesa vibratória por parafusos*



Embora esta forma de fixação seja de difícil aplicação prática, ela permite que seja avaliada a robustez do monobloco e dos componentes ópticos nele integrados, praticamente impedindo movimentos relativos entre o protótipo e a superfície da peça.

A Figura 6.7 mostra o protótipo e a fixação do monobloco à placa vibratória através de parafusos.

Frequência [Hz]	Direção de vibração	Desloc. [mm]	Resultado
0,5 a 10	horizontal (sem torção)	3,1 a 2,2	Franjas estáveis
	horizontal (com torção)	3,0 a 2,0	Franjas estáveis
	vertical (sem rotação)	2,5 a 2,0	Franjas estáveis
	vertical (com rotação)	2,4 a 2,0	Franjas estáveis
20 a 50	horizontal (sem torção)	2,1 a 1,5	Franjas estáveis
	horizontal (com torção)	2,0 a 1,3	Franjas estáveis
	vertical (sem rotação)	2,0 a 1,3	Franjas estáveis
	vertical (com rotação)	2,0 a 1,2	Franjas estáveis
100 a 150	horizontal (sem torção)	1,1 a 0,8	Franjas estáveis
	horizontal (com torção)	1,1 a 0,8	Franjas estáveis
	vertical (sem rotação)	1,1 a 0,8	Franjas estáveis
	vertical (com rotação)	1,1 a 0,9	Franjas estáveis

*Tabela 6.5- Resultados considerando fixação rígida por parafusos*

A Tabela 6.5 mostra resultados obtidos para algumas das faixas de frequência testadas. Os testes foram executados no intervalo de 0,5 a 180 Hz.

Os resultados apresentados permitem concluir que através da construção de uma estrutura tipo monobloco se obtém um sistema bastante robusto no que diz respeito aos elementos que compõem o interferômetro. Não foram observados problemas como movimentação das franjas na tela ou perdas de correlação para as

direções de vibração e faixas de frequência ensaiadas.

#### **6.4.4.2 Fixação Rígida à Peça Através de Cola**

A fixação do monobloco à superfície da peça pode ser feita através de cola.

Os resultados obtidos neste experimento foram idênticos à condição anterior (fixação direta através de parafusos).

Não houve perdas de correlação ou movimentação das franjas na tela.

As vantagens deste método residem na facilidade de fixação e independência do tipo de material da peça sob teste. Contudo, a colagem da base da estrutura diretamente sobre a peça a medir apresenta problemas:

- a fixação do sistema em superfícies curvas pode ser uma tarefa complicada;
- a dificuldade de remoção da estrutura depois de terminado o ensaio;
- a camada de cola que fica aderida à superfície inferior do módulo.

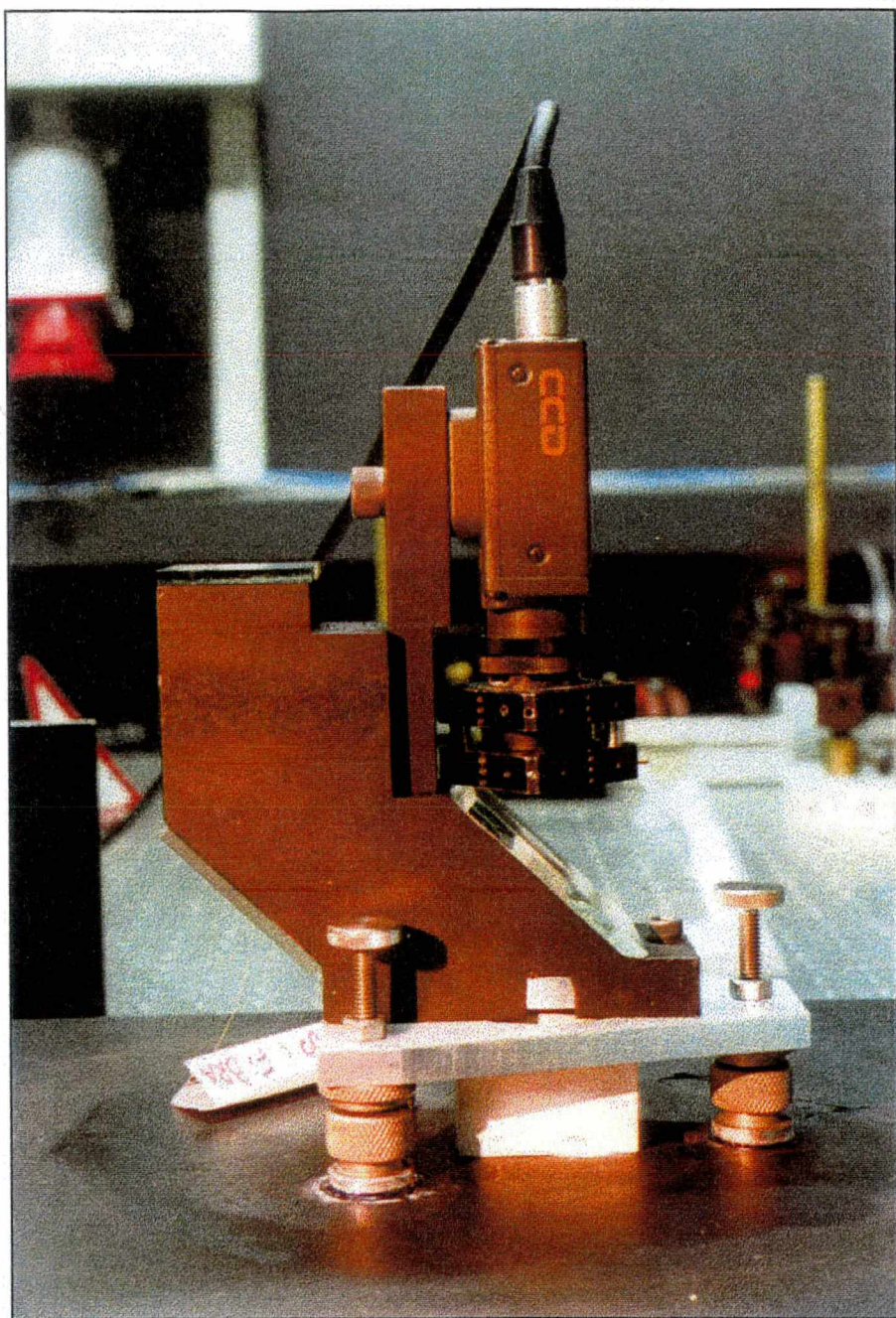
#### **6.4.4.3 Fixação Através de Sapatas Reguláveis e Cola**

As limitações de flexibilidade e praticidade dos métodos de fixação anteriores podem ser eliminados através da utilização de pequenos elementos de fixação auxiliares (tipo sapatas articuladas). Estas sapatas seriam fixadas à peça sob teste através de cola. Terminado o ensaio, o sistema seria desacoplado das sapatas e estas removidas através de golpes (sistema utilizado no instrumento RS 200).

A introdução de elementos que permitam articulações das sapatas é interessante quando se deseja trabalhar com superfícies não planas. Contudo, devem ser cuidadosamente projetadas para não comprometerem a rigidez do sistema. O ensaio a seguir ilustra melhor este problema. Neste experimento foram utilizados os elementos de fixação do sistema RS 200. O interferômetro é parafusado a uma placa intermediária. À placa são acoplados os elementos de fixação, conforme descrito no item 6.3.3. Estes por sua vez são colados à superfície da peça analisada.

A Figura 6.8 mostra o protótipo fixo à superfície através de sapatas e cola.





*Figura 6.8 - Fixação do protótipo à base vibratória através de sapatas reguláveis*

Os resultados para este tipo de fixação são apresentados na Tabela 6.6. Para frequências superiores a estabilidade das franjas é limitada pela amplitude de aceleração (ou deslocamento) e não pela faixa de frequências. Os resultados confirmam dados obtidos através de simulação, apontando como mais críticos os movimentos em planos perpendiculares ao eixo óptico do interferômetro.

Apesar da flexibilidade de fixação conferida, esta configuração (conforme



implementada<sup>43)</sup> não apresenta rigidez suficiente para utilização em condições severas.

Nas situações em que houve perda de qualidade, notou-se apenas movimentação das franjas na tela (proporcionais a amplitude do deslocamento), sem contudo haver perda de correlação. O sistema apresentou-se praticamente imune a choques mecânicos (Tabela 6.6)

Frequência [Hz]	Direção de vibração	Desloc. [mm]	Resultado
0,5 a 10	horizontal (sem torção)	0,4 a 0,3	Franjas estáveis
	horizontal (com torção)	0,4 a 0,3	Franjas estáveis
	vertical (sem rotação)	0,5 a 0,4	Franjas estáveis
	vertical (com rotação)	0,5 a 0,4	Franjas estáveis
0,5 a 10	horizontal (sem torção)	0,6 a 0,5	Movimentação das franjas
	horizontal (com torção)	0,6 a 0,5	Movimentação das franjas
	vertical (sem rotação)	0,7 a 0,6	Movimentação das franjas
	vertical (com rotação)	0,7 a 0,6	Movimentação das franjas
20 a 50	horizontal (sem torção)	0,4 a 0,3	Franjas estáveis
	horizontal (com torção)	0,4 a 0,3	Franjas estáveis
	vertical (sem rotação)	0,5 a 0,4	Franjas estáveis
	vertical (com rotação)	0,5 a 0,4	Franjas estáveis
20 a 50	horizontal (sem torção)	0,6 a 0,5	Movimentação das franjas
	horizontal (com torção)	0,6 a 0,5	Movimentação das franjas
	vertical (sem rotação)	0,7 a 0,6	Movimentação das franjas
	vertical (com rotação)	0,7 a 0,6	Movimentação das franjas

*Tabela 6.6- Resultados considerando fixação através de sapatas reguláveis e cola*

<sup>43)</sup> O aumento da rigidez das hastes de fixação e a eliminação da placa intermediária, de forma que as sapatas sejam acopladas diretamente ao monobloco, são medidas que aumentam a rigidez estrutural e, consequentemente, a robustez do sistema de fixação.

Foi executado um segundo ensaio, utilizando holografia eletrônica, para avaliar os tipos e a amplitude dos movimentos relativos do interferômetro em relação à peça. Como resultado, observou-se a combinação de dois tipos de movimentos: translação e flexão das hastes. Não houve formação de franjas a partir das interfaces pata-cola-peça, de forma que a cola não compromete a estabilidade.

Os fatores mais críticos são (nesta ordem): flexão das hastes, rotação e translação do conjunto junto ao acento esférico e folgas na fixação das hastes à placa intermediária.

O primeiro problema pode ser corrigido com a utilização de hastes mais robustas (maior diâmetro e menor altura).

A rotação também pode ser reduzida através da redução do momento flexor (hastes mais curtas), aumento da força de aperto entre as esferas e o acento ou aumento da área de contato. O fato do acento esférico estar próximo à superfície da peça resulta numa amplificação do movimento de rotação, que é diretamente proporcional ao comprimento da haste. A passagem do acento esférico para uma altura mais próxima à base do interferômetro elimina este efeito.

A eliminação das folgas entre as hastes e a placa intermediária pode ser conseguida através da execução de um rosca na placa no lugar de um simples furo passante.

A fim de aumentar as forças de contato devem ser utilizadas porcas que possam ser apertadas através de chaves e não manualmente.

#### **6.4.4.4 Fixação Através de Bases Magnéticas e Placa Intermediária**

Nesta concepção, as sapatas reguláveis são substituídas por pequenas bases magnéticas acionadas mecanicamente. Da forma como foi implementada no protótipo não é possível inclinar as sapatas. Apenas movimentos de rotação no plano são permitidos. O sistema é prático e rápido. Apresenta o inconveniente de não poder ser usado em qualquer tipo de material. Não foi testado em superfícies curvas. A influência da rugosidade e outras características da superfície da peça não foram avaliadas. A superfície da peça utilizada no ensaio foi revestida com uma camada de tinta e não



apresentava grandes sinais de corrosão.

Os resultados obtidos mostram que novamente há uma faixa de amplitudes de aceleração (deslocamento) críticos. Deslocamentos superiores a 1 mm levam à pequenas oscilações das franjas, porém sem perda de correlação. Note-se que amplitudes desta ordem não são comuns em ambiente industrial. A movimentação das franjas na tela foi muito menor quando comparada à situação anterior.

Conforme pode ser visto na Figura 6.9, a montagem utilizada não é ideal, uma vez que a altura do interferômetro em relação à peça é muito grande. A redução desta altura e a eliminação da placa intermediária tende a um sistema mais robusto. A rigidez das bases magnéticas empregadas também pode ser aumentada através da eliminação de uma placa que permite utilizar parafusos com rosca métrica. A utilização de imãs tipo terras-raras permite a fixação mais eficiente.

O sistema apresenta maior sensibilidade a choques mecânicos do que quando utilizada a configuração anterior, porém não podendo ser considerada crítica.



*Figura 6.9 - Fixação através de bases magnéticas acionadas mecanicamente*

## 6.5 Conclusões

A partir dos resultados experimentais foi possível assegurar a viabilidade do uso do interferômetro radial na presença de vibrações. A concepção de uma estrutura que agrupa rigidamente os elementos ópticos garante a robustez do sistema. Não houve influência das vibrações (dentro das condições testadas) sobre os componentes que compõem o interferômetro.

Sem dúvida, o fator crítico reside na fixação do interferômetro à peça a medir.

A fixação através de bases magnéticas é prática e rápida, podendo ser utilizada em condições não severas de vibração. Não houve problemas de fixação sobre-cabeça. Apresenta como inconvenientes a impossibilidade de utilização em materiais não ferromagnéticos além de depender de características da superfície da peça, tais como curvatura e rugosidade.

A utilização de cola (tipo Super Bonder) é suficiente para garantir uma boa fixação, desde que haja tempo suficiente para cura (de 10 a 15 minutos).

Sapatas reguláveis permitem um sistema mais flexível. Porém, seu emprego requer um projeto cuidadoso, atentando para eliminação de folgas e movimentos devido a flexão e rotação. O sistema conforme utilizado no modelo RS 200 apresentou os seguintes problemas: falta de rigidez das hastes, rotação em torno dos acetos esféricos e folgas. Os resultados obtidos não foram satisfatórios. O sistema pode ser melhorado de forma a atingir os requisitos de projeto.

O emprego de sapatas rígidas (sem ajuste de inclinação) não foi testada, apesar de que os resultados obtidos nos ensaios sugeriram que não se tenha problemas. Haveria dificuldades de fixação em superfícies irregulares ou curvas.



## 7. Protótipo de Tecnologia e Detalhamento de seus Subsistemas

Os resultados obtidos em simulações e testes experimentais comprovaram a viabilidade da construção de um protótipo de tecnologia para a medição de tensões residuais em campo usando a holografia eletrônica.

Considerando os requisitos estabelecidos no início do projeto, o sistema foi então subdividido em duas partes: unidade central e cabeçote de medição.

A unidade central agrega componentes como computador e fonte laser. O objetivo é reunir nesta unidade os sistemas de processamento e controle, além dos componentes cujas dimensões ou massas possam comprometer os requisitos de portabilidade e robustez do cabeçote de medição. A unidade central deve poder operar à uma certa distância do cabeçote de medição.

O cabeçote de medição compreende os sistemas através dos quais o sinal de medição<sup>44</sup> é gerado, adquirido e transmitido à unidade de processamento.

A necessidade de um sistema compacto e robusto direcionou a montagem do cabeçote segundo uma estrutura rígida, tipo monobloco<sup>45</sup>, na qual se integram os diversos componentes e subsistemas essenciais para cumprir as funções estabelecidas.

O detalhamento do cabeçote de medição foi feito a partir de uma concepção básica, prevendo a integração de diversos subsistemas: fixação, iluminação, visualização, proteção da câmera de vídeo, furação, deslocamento de fase e estrutura (monobloco).

Neste capítulo são apresentados o detalhamento dos subsistemas<sup>46</sup>, algumas das propostas para implementar cada um deles e o protótipo desenvolvido.

---

<sup>44</sup> Sinal elétrico analógico de saída da câmera de vídeo correspondente às intensidades pixel a pixel adquiridas durante cada etapa do processo de medição, correspondentes ao diferentes estados de deformação da peça.

<sup>45</sup> Conforme resultados apresentados no Capítulo 6.

<sup>46</sup> No decorrer do texto os diversos componentes dos subsistemas são identificados através de um número que segue a sua denominação por extenso. Esta numeração também é apresentada nas figuras e tabelas que se referem a cada subsistema específico.



## **7.1 A Unidade Central de Controle e Processamento**

Na unidade central são realizadas as operações de processamento dos dados adquiridos, o controle e a sincronização dos componentes eletro-eletrônicos como placa de processamento de imagens e driver do transdutor piezoelétrico. A unidade central também aloja o laser e, opcionalmente, um pequeno reservatório com ar comprimido a alta pressão para acionamento de uma furadeira pneumática.

A unidade central é constituída pelos seguintes componentes:

- micromputador PC;
- placa de processamento de imagens;
- placa para conversão A/D e D/A;
- circuito de controle do sistema de deslocamento de fase;
- fonte de luz laser He-Ne 17 mW;
- fibra óptica *single-mode*;
- reservatório de ar comprimido a alta pressão em conjunto com válvula reguladora de pressão (opcionais).

## **7.2 O Cabeçote de Medição**

O cabeçote constitui o sistema mais importante do protótipo, reunindo componentes críticos para geração, aquisição e transmissão do sinal de medição até a unidade central de processamento. Além de compacto e robusto, a flexibilidade de fixação em superfícies curvas é um requisito importante deste sistema.

A comunicação entre o cabeçote de medição e a unidade central é estabelecida através de uma fibra óptica, cabos elétricos e mangueira de ar comprimido. A fibra óptica traz a luz do laser e os cabos elétricos estabelecem a ligação com a câmera de vídeo e o transdutor piezoelétrico. A mangueira de ar comprimido alimenta uma furadeira pneumática de alta rotação.

Na estrutura monobloco do cabeçote de medição estão integrados os sistemas de fixação, furação, iluminação, visualização e deslocamento de fase (transdutor piezoelétrico).

### 7.2.1 Sistema de Fixação do MATER à Superfície da Peça a Medir

O sistema de fixação é um dos conjuntos mais importantes viabilizar a utilização em campo do interferômetro radial. Ao mesmo tempo em que uma fixação bastante robusta é fundamental, o requisito de flexibilidade não pode ser negligenciado. O sistema deve garantir fixação “rígida” do cabeçote de medição em superfícies planas ou com raios de curvaturas não inferiores a 100 mm.

Dentre as diferentes concepções testadas, a solução adotada neste trabalho consiste de três hastes robustas montadas em rótulas esféricas, dispostas nas laterais e na parte de trás do monobloco.

As hastes (1.1) são roscadas (M10x1) para permitir ajuste de altura. Uma vez determinada a altura correta<sup>47</sup>, as hastes são travadas através de *contra-porcas* (1.6). O pequeno passo da rosca menor é justificado por diminuir a tendência das hastes se soltarem em função de vibrações ou choques.

O ajuste angular é possível através da montagem das hastes sobre um acento esférico ou cônico<sup>[75,76, 77]</sup>. Uma solução simples foi a adoção das rótulas esféricas<sup>[78]</sup>. Para este sistema foram especificadas *rótulas SKF GE-20ES* (1.2).

O travamento na posição angular desejada pode ser feita de duas formas:

- a) através de *cunhas de aço 4140 temperado* (1.4.1 e 1.4.2) que se fecham sobre as rótulas, através do aperto de um *parafuso M6* (1.5a).
- b) através de um *parafuso M8* (1.5b), que prende a própria estrutura lateral do monobloco à rótula. Nesta segunda solução é importante que sejam executados na estrutura lateral do monobloco dois pequenos furos ligados através de um canal até o acento da rótula. Esta medida garante um alívio de tensões na estrutura no momento do aperto, permite que o contato entre as superfícies do acento e da rótula se dê ao longo de toda a periferia, conseqüentemente, reduzindo a força de aperto necessária ao travamento.

Na Figura 7.1 são mostrados os componentes e detalhes construtivos das duas soluções.

---

<sup>47</sup> As altura das hastes deve ser ajustada de forma tal que a profundidade focal do interferômetro coincida com a deste até à peça.



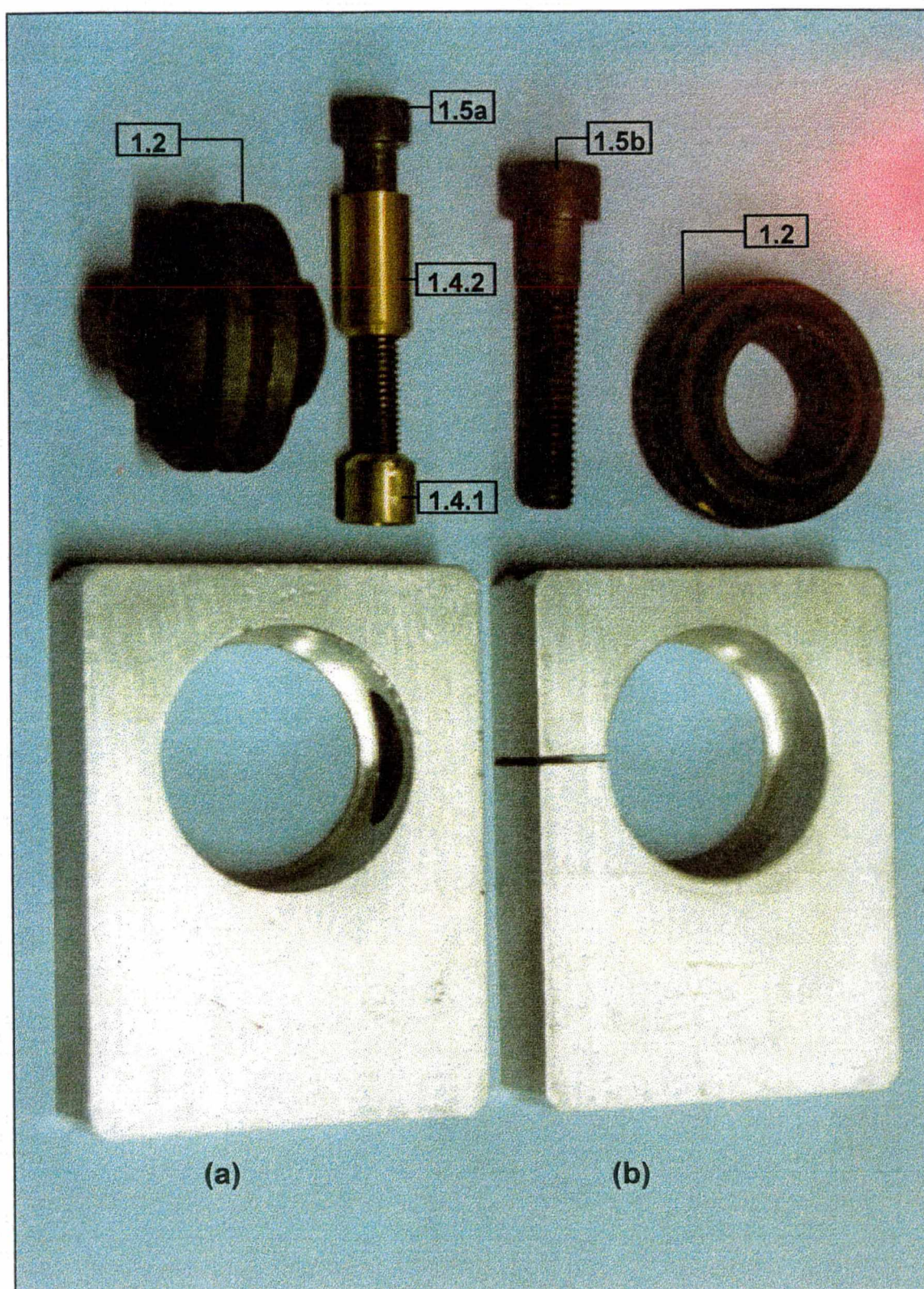


Figura 7.1- Soluções para travamento das hastes usando rótulas esféricas<sup>48</sup>

<sup>48</sup> A identificação detalhada(número e denominação) dos componentes são apresentadas na



Foram realizados vários testes práticos comparando as duas soluções considerando a rigidez do aperto obtida, a resistência dos componentes e a facilidade de operação. Através da primeira solução se consegue uma mesma condição de aperto aplicando um torque menor no parafuso.

Contudo, a solução (b) garante uma fixação mais eficiente, uma vez que o contato entre a estrutura monobloco e a rótula ocorre ao longo de toda a sua periferia. Esta situação é especialmente interessante quando existe a tendência de movimentação do sistema numa direção normal ao plano de fixação.

Na fixação por cunhas, o torque de aperto é limitado pela deformação plástica destes componentes<sup>49</sup>.

Na fixação direta através de parafuso, o torque de aperto é limitado pela resistência da rosca usinada na estrutura do monobloco. Embora apresente inconvenientes óbvios, esta solução mostrou não apresentar problemas mesmo quando aplicado um torque<sup>50</sup> acima do necessário para atingir a condição de travamento.

Uma vantagem importante da primeira solução está na possibilidade de substituição rápida e barata das cunhas de travamento em caso de falha por plastificação excessiva. Na segunda concepção, havendo problemas com a rosca, esta deve ser refeita ou, numa situação mais crítica, substituído todo o monobloco de alumínio. Como os resultados dos testes de bancada foram semelhantes para ambas soluções e considerando o diferencial anterior, optou-se por implementar no protótipo o sistema de fixação por cunhas.

As hastes são fixadas à superfície da peça através de cola. Colas à base de cianoacrilato garantem rapidez de fixação enquanto que colas de epóxi permitem uma fixação mais eficiente quando a qualidade superficial da peça a medir é ruim.

Uma solução que não chegou a ser implantada, mas que se mostrou interessante em testes preliminares, foi a fixação por elementos magnéticos. Através de ímãs de terras-raras (NdFeB e SmCo) é possível conseguir elevadas forças de

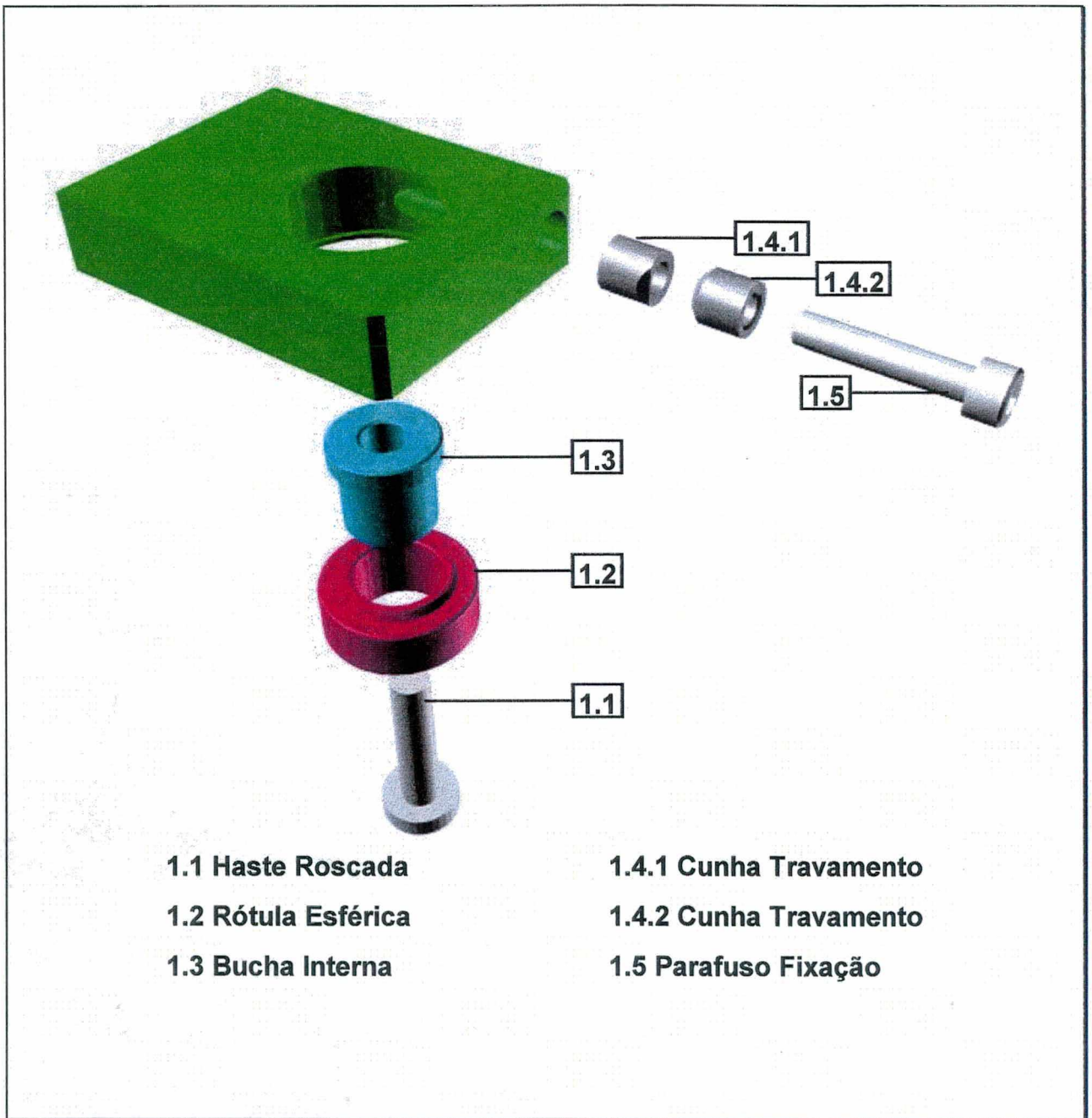
---

<sup>49</sup> As tensões que surgem na interface rótula-cunha são muito elevadas (determinadas pelas equações de Hertz para contato entre uma superfície cilíndrica e uma plana).

<sup>50</sup> Foram realizadas em torno de mil operações de aperto sem que houvesse comprometimento da rosca usinada no monobloco.

fixação. Esta solução apresenta como principais vantagens a rapidez e a simplicidade de fixação do sistema. Embora não implementada nesta etapa do projeto, sua utilização deve ser considerada futuramente.

A Figura 7.2 mostra , através de uma vista explodida, a solução (a) adotada para fixação do MATER à superfície da peça a medir.



*Figura 7.2 - Solução adota para implementar o sistema de fixação*



Numeração	Denominação	Quantidade
1.1	Haste Roscada de Fixação	03
1.2	Rótula Esférica GE 20 ES	03
1.3	Bucha Interna	03
1.4.1	Cunha de Travamento	03
1.4.2	Cunha de Travamento	03
1.5a	Parafuso M6	03
1.5b	Parafuso M8	Não implementado
1.6	Contra-Porca	03

*Tabela 7.1 - Componentes do sistema de fixação*

**7.2.2 Sistema de Iluminação**

Através do sistema de iluminação um feixe de laser deve ser gerado e trazido até o cabeçote de medição onde será expandido, colimado e direcionado até o interferômetro radial e a peça a medir.

O sistema deve ser leve, compacto e robusto. Influências externas como flutuações de temperatura e vibrações não devem, dentro dos limites estabelecidos em estudos preliminares, alterar as propriedades do padrão de iluminação. O sistema de iluminação deve ainda permitir a integração do sistema de deslocamento de fase, além de ajustes de componentes até que seja alcançada uma condição ideal de iluminação.

**7.2.2.1 Fonte de Luz**

Os requisitos de iluminação monocromática coerente exigidos na holografia nos direcionam à utilização do laser a gás no lugar de outras fonte de luz. Neste primeiro

protótipo é utilizado um laser He-Ne de 17 mW, acondicionado na unidade central. A decisão pelo emprego do laser a gás foi feita em função da estabilidade<sup>51</sup> apresentada por este tipo de configuração, dispensando o uso de sistemas complementares de estabilização. O uso de radiação visível facilita as operações de ajuste e contribui para uma maior segurança do sistema.

No entanto, o laser a gás apresenta uma desvantagem significativa: devido às dimensões da cavidade de ressonância, o laser não pode ser integrado diretamente ao cabeçote de medição. O laser é então montado na unidade central e a luz é conduzida até o cabeçote de medição através de uma fibra óptica. Desta solução decorrem problemas que limitam a robustez de todo o sistema de medição:

- sensibilidade à influências externas, principalmente vibrações e choques mecânicos;
- fibras ópticas são componentes extremamente frágeis e sensíveis a esforços mecânicos, requerendo um sistema adicional de proteção;
- perdas elevadas na transmissão da luz, exigindo uma fonte com maior potência de iluminação;
- o acoplamento da fibra óptica com o laser é um fator crítico; de forma tal que pequenos desalinhamentos comprometem sobremaneira a continuidade da transmissão da luz.

Embora ainda não esteja sendo utilizado neste protótipo, é muito grande a probabilidade de substituição futura do laser a gás por um diodo semiconductor laser, montado diretamente no cabeçote de medição. Tecnicamente, este último tipo de laser tem evoluído rapidamente nos últimos anos, já podendo ser encontrado a preços competitivos no mercado. Até então, um dos maiores obstáculos à utilização dos diodos-laser era o seu pequeno comprimento de coerência. Contudo, sistemas apropriados de estabilização e controle de corrente e temperatura permitiram o desenvolvimento de lasers com comprimento de coerência e potência de iluminação bastante adequados à utilização em técnicas interferométricas.

Considerando este aspecto, o sistema de iluminação e a própria estrutura

---

<sup>51</sup> Definida em função do comprimento de coerência.



monobloco do cabeçote de medição, como será visto mais adiante, foram desenvolvidos considerando a futura integração de um diodo laser.

### **7.2.2.2 Transmissão da Luz da Unidade Central até o Cabeçote de Medição**

A luz é transmitida através de uma fibra óptica *single-mode*(2.7). A fibra *single-mode*, comparado à *multi-mode*, é pouco sensível à influências do ambiente externo, tais como temperatura, vibrações ou pequenos choques mecânicos.

São necessários cuidados especiais nos acoplamentos da fibra com o laser e com o cabeçote de medição.

### **7.2.2.3 Expansão e Colimação da Luz**

A luz ao sair da fibra óptica deve ser expandida até o diâmetro externo do interferômetro radial. O feixe de laser apresenta um perfil gaussiano de intensidade que diminui do centro para a periferia. Contudo, é necessário que dentro da coroa correspondente aos diâmetros maior e menor do interferômetro radial, o perfil seja o mais uniforme possível. Testes experimentais com a fibra óptica mostraram que o cone de luz na saída da fibra<sup>52</sup> é suficiente para garantir um perfil adequado. Considerando o ângulo de iluminação formado pelo feixe à saída da fibra óptica e uma expansão até o diâmetro de 40 mm, é necessário um caminho óptico equivalente a 175,5 mm.

Através da reflexão em dois *espelhos planos*<sup>53</sup> (2.1 e 2.2), um deles furado na região central, o feixe é expandido e direcionado até uma *lente de colimação* (2.3). Esta lente apresenta um comprimento focal de 174 mm (5,75 D) e pode ser ajustada na montagem até que se consiga um feixe paralelo.

---

<sup>52</sup> Determinada experimentalmente, a porção do cone que apresenta um perfil suficientemente homogêneo é definida através de um ângulo sólido de 13°.

<sup>53</sup> Os espelhos planos utilizados têm qualidade de  $\lambda/2$  e a reflexão ocorre na primeira superfície.



#### 7.2.2.4 Iluminação da Região de Medição

Através de um terceiro *espelho plano inclinado a 45°* (2.4), o feixe de laser colimado é direcionado até o interferômetro radial e finalmente, à superfície da peça a medir.

O espelho plano tem um furo elíptico na região central de forma a não iluminar diretamente a região de medição e também permitir a passagem da furadeira no momento em que será usinado o furo de alívio de tensões.

O *interferômetro radial* (2.5.1 e 2.5.2), ilumina a peça a medir segundo uma região circular, com diâmetro de 10 mm. O interferômetro foi dimensionado de forma que o plano focal seja estabelecido a uma profundidade de 3 mm.

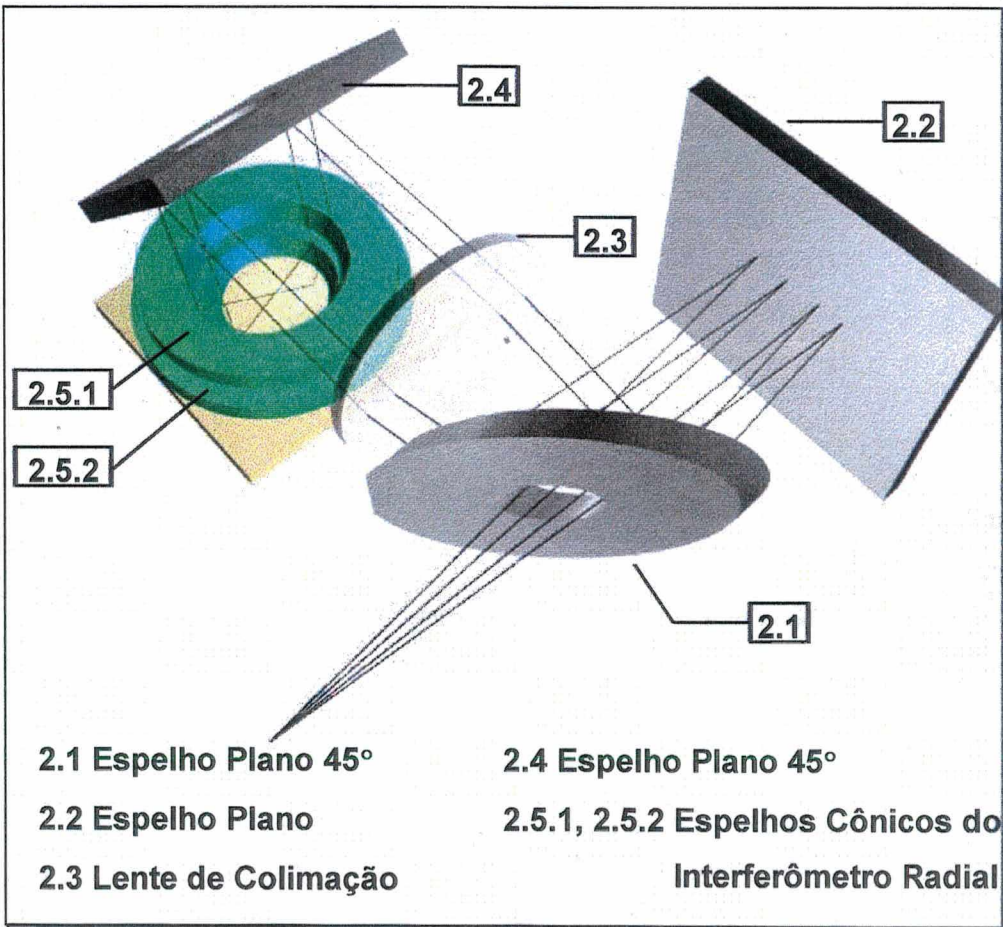


Figura 7.3 - Componentes do sistema de iluminação no cabeçote

Numeração	Denominação	Quantidade
2.1	Espelho Plano 45° com Furo Central Elíptico (2ª reflexão)	01
2.2	Espelho Plano (1ª reflexão)	01
2.3	Lente de Colimação	01
2.4	Espelho Plano 45° com Furo Elíptico Central (3ª reflexão)	01
2.5.1	Espelho Cônico Superior do Interferômetro Radial	01
2.5.2	Espelho Cônico Inferior do Interferômetro Radial	01
2.6	Suporte para Acoplamento da Fibra Óptica	01
2.7	Gabarito para Fixação e Posicionamento do Espelho Plano de 2ª Reflexão	01
2.8	Suporte para Fixação da Lente de Colimação	01
2.9	Fibra Óptica Single-mode	01
2.10	Laser He-Ne 17 mW <sup>54</sup>	01

*Tabela 7.2 - Componentes do sistema de Iluminação*

### **7.2.3 Sistema de Visualização**

O sistema deve permitir a visualização da região da peça a ser medida e também a visualização do furo depois de usinado, a fim de determinar seu diâmetro

<sup>54</sup> Embora montado na unidade central de processamento, o laser faz parte do sistema de iluminação.

efetivo.

São requisitos importantes do sistema:

- ampliação adequada da região de medição e do furo, sem introduzir aberrações ópticas significativas;
- robustez, dimensões compactas e pequena massa;
- integração com demais subsistemas, principalmente o de furação;
- ajuste da intensidade luminosa que chega à câmera de vídeo;
- câmera de vídeo com sensibilidade, resolução espacial e relação sinal ruído adequadas;
- facilidade de operação.

O sistema foi subdividido em visualização da região de medição e do furo. Essa divisão foi determinada pelas diferenças de ampliação que cada um destes sistemas requer. Uma vez que a posição da câmera de vídeo é ajustada na montagem e não deve ser alterada posteriormente, é muito difícil encontrar uma configuração de tripletos em dimensões comerciais cujas características satisfaçam simultaneamente às duas condições de ampliação.

### 7.2.3.1 Câmera de Vídeo CCD

A câmera de vídeo (3.9), dada a sua importância dentro do sistema, será tratada à parte.

A seleção da câmera adequada é determinada em função de vários parâmetros<sup>55</sup>:

- dimensões externas da câmera (inferiores a 50 mm x 50 mm x 80 mm);
- sensibilidade<sup>56</sup> (mínima de 0,5 lux @ auto-ganho desligado);

---

<sup>55</sup> Os valores entre parênteses referem-se aos requisitos estabelecidos para este protótipo.

<sup>56</sup> A sensibilidade da câmera e a relação sinal-ruído estão vinculadas com o ganho ajustado na câmera. A maioria dos fabricantes apresentam a sensibilidade da câmera com o ganho ajustado em seu valor máximo, enquanto que a relação sinal-ruído é apresentada com o ganho no valor mínimo. Em poucas palavras, a questão se resume em: para alcançar a sensibilidade indicada, a relação sinal-ruído pode



- resolução espacial ( superior a 500 linhas horizontais);
- relação sinal/ruído (superior a 50 dB @ auto-ganho desligado);
- dimensões da matriz de elementos fotossensores (  $1/3$  ",  $1/2$  " ou  $2/3$  " );
- faixa dinâmica de operação (*dynamic range*);
- resposta espectral (alta sensibilidade próximo ao vermelho);
- ajuste e desligamento da função de auto-ganho.

Existem no mercado uma série de modelos de diversos fabricantes que satisfazem às condições estabelecidas acima. Dentro deste universo, foram selecionados inicialmente dois modelos:

- a câmera TM-7CN do fabricante Pulnix com CCD de  $1/2$  " ;
- a câmera KP-M1 do fabricante Hitachi com CCD de  $2/3$  " .

Ambos os modelos têm características muito semelhantes, basicamente diferindo entre si pelas dimensões da matriz fotossensora. Esta característica é importante no momento do dimensionamento e seleção das lentes que determinam a correta ampliação e focalização do objeto.

Dentre as várias configurações destas câmeras com lentes comercialmente disponíveis, que foram avaliadas através de simulação, decidiu-se pela utilização da câmera KP-M1 por permitir a formação de um conjunto lentes-câmera de menores dimensões.

### **7.2.3.2 *Subsistema de Visualização da Região de Medição Definida pelo Interferômetro Radial***

A visualização da região de medição deve ser compatibilizada com o requisito de acesso à superfície da peça pela furadeira. A solução adotada consiste de *uma guia cilíndrica(5.1)* com um sistema isostático de posicionamento na parte superior.

---

ser muito menor do que a apresentada no manual. A maneira correta de apresentar estes parâmetros seria: a relação sinal ruído para a câmera modelo XYZ é, por exemplo, > 60 dB @ 0,5 lux para um sinal de saída de vídeo de 100IRE.

Esta guia permite posicionar, em certo momento, um conjunto íris, lente e espelho, de forma que a câmera de vídeo possa “enxergar” a região de medição. Uma vez adquiridas as imagens de interesse, o conjunto é retirado e substituído pela furadeira para que seja usinado o respectivo incremento na profundidade do furo.

A repetibilidade de posicionamento é determinada por três rasgos em “V” a  $120^\circ$  executados na parte superior da guia e por três esferas situadas no suporte do conjunto óptico. Estas esferas encaixam de forma única nos rasgos, garantindo uma repetibilidade de posicionamento submicrométrica.

O conjunto óptico consiste de um suporte de alumínio que comporta, em sua extremidade inferior uma *íris* (3.6) que permite uma abertura máxima de 8 mm, montada em frente a um *triplete* (3.3) com comprimento focal de 35 mm e diâmetro de 15 mm e de um *espelho plano inclinado em  $45^\circ$*  (3.2).

A íris tem a função de permitir o ajuste da abertura numérica do sistema. Esta abertura pode ser alterada pelo usuário do sistema.

O sistema de visualização deve garantir que um objeto circular de 8mm de diâmetro seja projetado por inteiro sobre a área útil de uma câmera CCD de  $2/3''$  ( 6,6 x 8,8 mm)<sup>57</sup>. Nestas condições, com uma lente de comprimento focal de 35 mm, ficam estabelecidas distâncias objeto-lente e lente-CCD de 63,8 mm e 77,4 mm, respectivamente. Para reduzir efeitos de aberrações ópticas, é utilizado um triplete Steinheil.

A câmera de vídeo é posicionada perpendicularmente ao eixo da guia e do suporte do conjunto óptico. A posição da câmera pode ser ajustada e é determinada na montagem. É recomendável que a posição da câmera não seja alterada pelo usuário, uma vez que os parâmetros do programa de processamento são determinados em função da posição inicial.

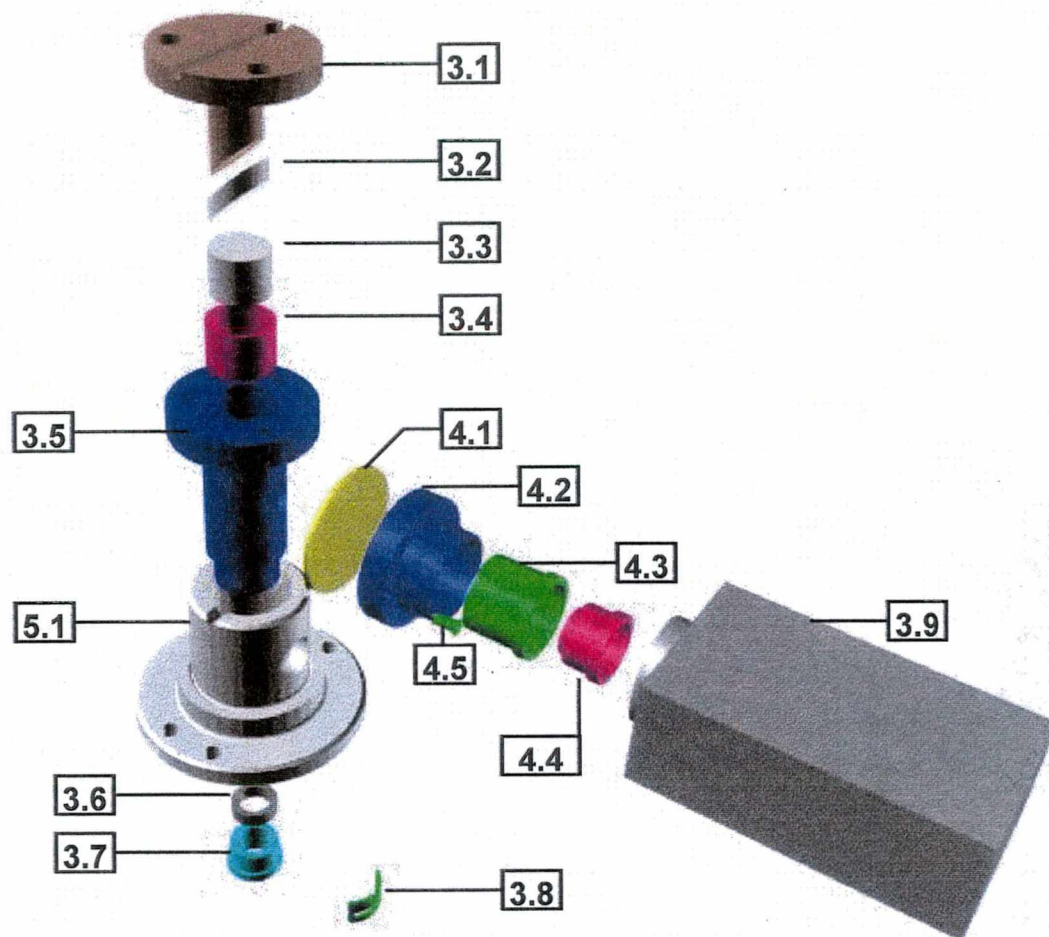
A Figura 7.4 e a Figura 7.5 mostram os componentes do sistema e sua montagem.

A Tabela 7.3 descreve os componentes do sistema de visualização da região de medição.

---

<sup>57</sup> Corresponde a uma ampliação de 0,825.





**3.1 Suporte Espelho**

**3.2 Espelho Plano**

**3.3 Lente (Tripleto) Visualização**

**3.4 Bucha p/ Montagem da Lente**

**3.5 Carcaça**

**3.6 Íris**

**3.7 Suporte Íris**

**3.8 Anel p/ Controle Abertura Íris**

**3.9 Câmera CCD**

**4.1 Janela Móvel de Proteção**

**4.2 Cilindro Externo do Corpo**

**4.3 Cilindro Intermed. do Corpo**

**4.4 Cilindro interno do Corpo**

**4.5 Parafuso de Fixação**

**5.1 Guia p/ Furação e Montagem do Conjunto de Observação**

Figura 7.4 - Vista explodida do sistema de visualização da região de medição

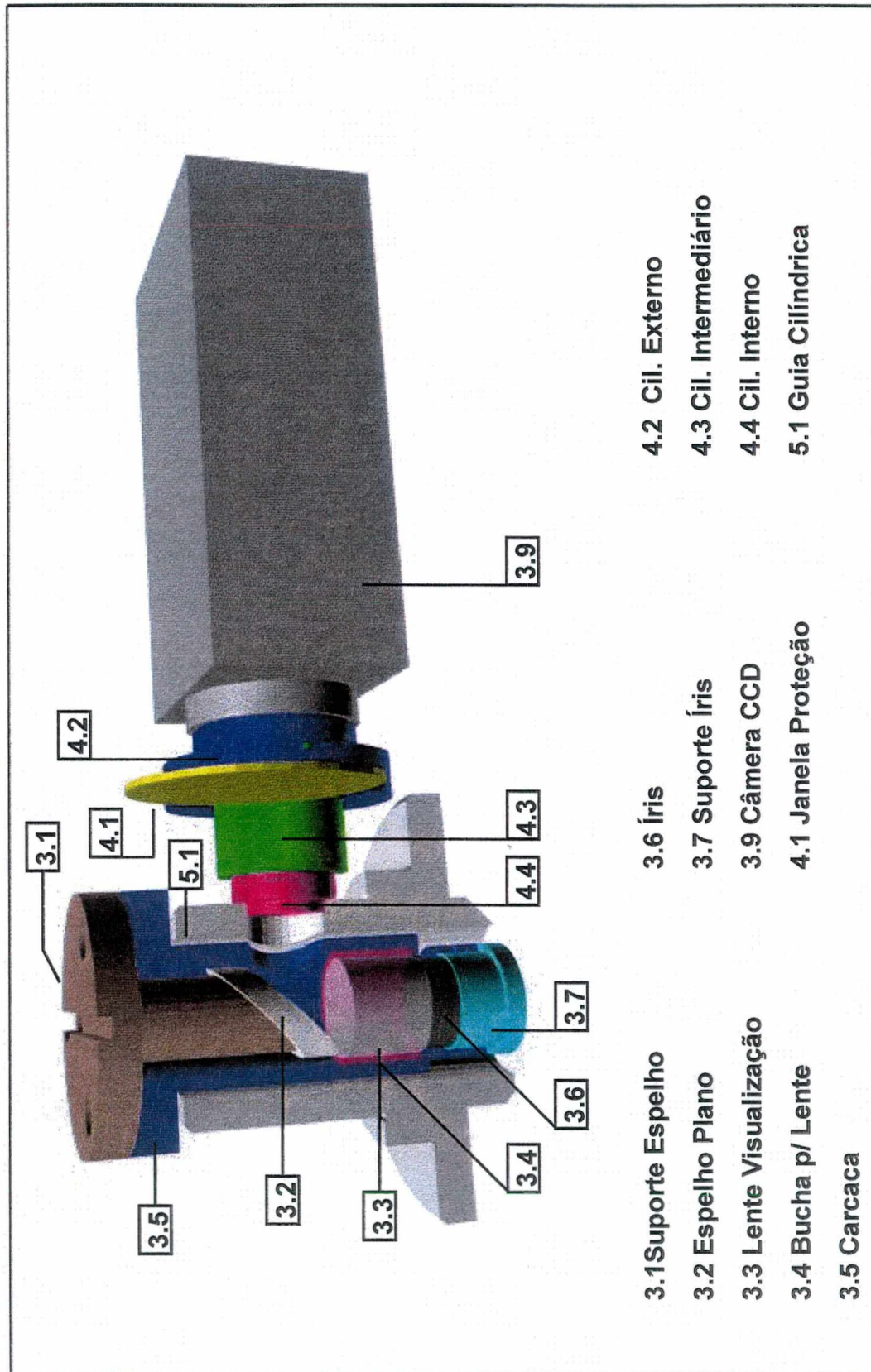


Figura 7.5 - Vista em corte parcial do sistema de visualização montado



Numeração	Denominação	Quantidade
3.1	Suporte do Espelho Plano 45° para Visualização da Região de Medição	01
3.2	Espelho Plano 45° para Visualização da Região de Medição	01
3.3	Lente (Tripleto) Steinheil para Visualização da Região de Medição	01
3.4	Bucha para Fixação da Lente de Visualização da Região de Medição	01
3.5	Carcaça - Suporte Isostático do Conjunto Óptico	01
3.6	Íris	01
3.7	Bucha para Fixação da Íris	01
3.8	Trava de Ajuste da Abertura da Íris	01
3.9	Câmera de Vídeo CCD	01

*Tabela 7.3 - Componentes do Sistema de Visualização da Região de Medição*

#### **7.2.3.3 Sistema de Visualização do Furo**

O objetivo deste sistema é permitir a medição automatizada do diâmetro e forma do furo usinado na peça cujo estado de tensões se pretende determinar. Para diminuir a incerteza do processo o furo deve ser ampliado ao máximo, ou seja projetado, sobre a maior área possível do sensor CCD.

O sistema de visualização anterior definiu a posição da câmera CCD, isto é, a soma das distâncias objeto-lente e lente-CCD. Um *tripleto*(3.12) de 28,4 mm de comprimento focal garante uma condição adequada de ampliação e focalização.

O sistema de visualização do furo difere do anterior pela ausência da íris, pela lente utilizada e sua posição dentro do suporte. Neste sistema, a altura da lente também pode ser ajustada na montagem de forma a permitir boa focalização. Uma vez ajustada, a lente é travada por parafusos e não deve mais ter sua posição alterada.

A Tabela 7.4 descreve os componentes do sistema de visualização do furo.

<b>Numeração</b>	<b>Denominação</b>	<b>Quantidade</b>
3.5	Suporte Isostático do Conjunto Óptico	01
3.9	Câmera de Vídeo CCD	01
3.10	Suporte do Espelho Plano 45° para Visualização do Furo	01
3.11	Espelho Plano 45° para Visualização do Furo	01
3.12	Lente (Tripleto) Steinheil para Visualização do Furo	01
3.13	Bucha para Fixação da Lente de Visualização do Furo	01

*Tabela 7.4 - Componentes do Sistema de Visualização do Furo*

#### **7.2.4 Sistema de Proteção da Câmera**

Os objetivos deste sistema são proteger a câmera de agentes externos como partículas de poeira e impedir a entrada de luzes parasitas.

O sistema deve ser leve, compacto, robusto, de fácil operação, integrar-se com o sistema de visualização e assumir posição de fechamento quando a câmera não estiver sendo utilizada.

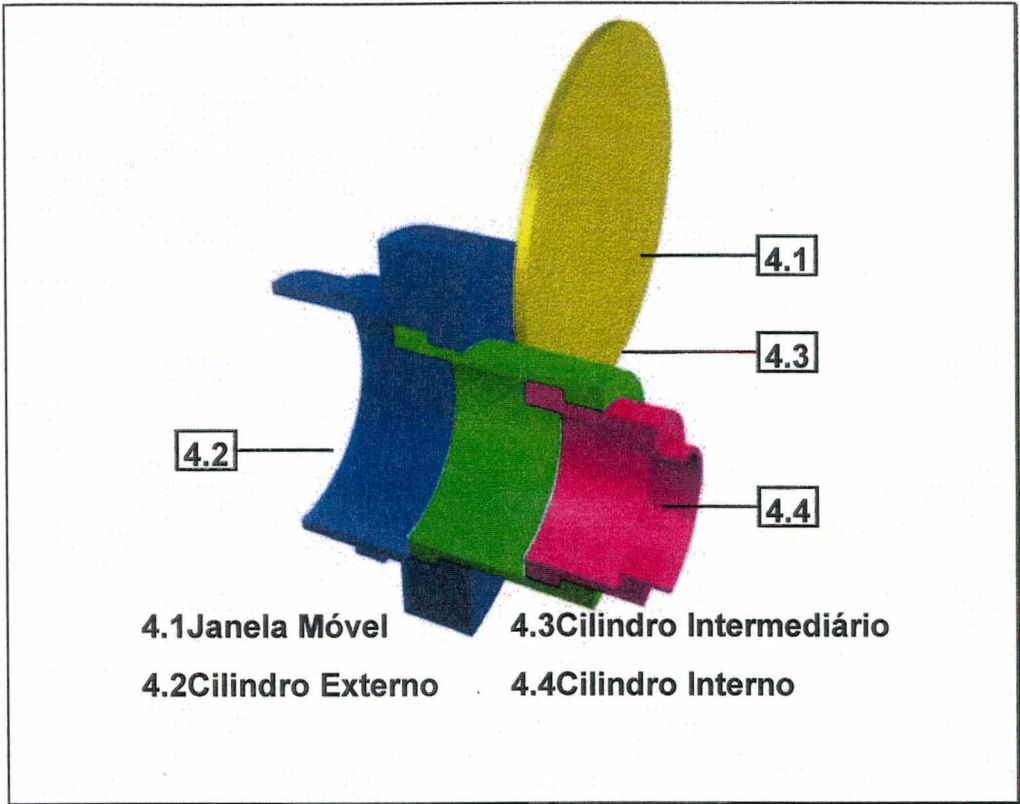


Figura 7.6 - Montagem dos componentes do sistema de proteção da câmera CCD

A solução adotada foi um sistema telescópico integrado à câmera de vídeo. Uma janela móvel (4.1) e três cilindros deslizantes acionados através de uma mola constituem o sistema.

Numeração	Denominação	Quantidade
4.1	Janela Móvel	01
4.2	Cilindro Externo	01
4.3	Cilindro Intermediário	01
4.4	Cilindro Interno	01
4.5	Mola de Acionamento	01

Tabela 7.5 - Componentes do Sistema de Proteção da Câmera CCD



### **7.2.5 Sistema de Furação**

O sistema de furação deve garantir que o furo de alívio de tensões seja executado obedecendo aos parâmetros geométricos e de centragem determinados na literatura científica e estudos prévios apresentados no capítulo 4 deste trabalho.

O sistema deve ser leve, compacto, de fácil operação, permitir a usinagem progressiva do furo, integrar-se com os demais subsistemas e não introduzir tensões residuais durante a furação. O últimos dois requisitos são os mais importantes e também os mais difíceis de serem alcançados. A literatura aponta o processo de usinagem mecânica através de uma furadeira de altíssima rotação (acima de 300.000 rpm) e uma microfresa cônico-invertida como sendo o mais apropriado para uso em campo, considerando a qualidade geométrica do furo obtido, o nível de tensões residuais introduzido pela furação e outros fatores como custo, massa e dimensões do conjunto.

A usinagem eletroquímica é uma alternativa para execução do furo com boas chances de no futuro substituir a furação mecânica. A primeira técnica apresenta a vantagem de não introduzir tensões residuais. A falta de repetitividade da geometria do furo e as dimensões dos sistemas hoje disponíveis ainda limitam sua utilização em campo.

Considerando as informações anteriores, optou-se pela utilização da técnica de usinagem mecânica no protótipo. O sistema de furação foi desenvolvido para operar com duas furadeiras pneumáticas<sup>58</sup>. Uma guia cilíndrica e um anel micrométrico que funciona como batente mecânico garantem, respectivamente, a centragem da furadeira e o controle de profundidade de furação.

#### **7.2.5.1 Furadeiras e Ferramentas de Corte**

Os principais requisitos para seleção do conjunto furadeira-ferramenta são:

- as dimensões do conjunto que será integrado ao cabeçote de medição;

---

<sup>58</sup> Serão utilizadas duas furadeiras com o objetivo de verificar qual a mais adequada.

- a fonte de energia utilizada;
- qualidade geométrica dos furos gerados, definida em função de folgas radiais e axiais existentes na furadeira;
- nível de tensões residuais introduzido pelo processo de furação.

O mercado apresenta um universo bastante amplo de modelos de furadeiras cujas características se aproximam bastante dos requisitos anteriores. Infelizmente, a maioria dos modelos encontrados têm sua aplicação destinada a execução de furos que não requerem grande qualidade geométrica ou o torque desenvolvido é muito elevado. Esta última característica é indesejável, uma vez que tende a introduzir um maior nível de tensões residuais durante a furação. Não existe ainda uma furadeira cuja aplicação seja destinada especificamente à usinagem de furos com as características exigidas pela técnica de alívio de tensões utilizada neste trabalho<sup>59</sup>.

Os modelos mais adequados são as turbinas pneumáticas de alta rotação para uso odontológico. Contudo, estas furadeiras podem apresentar folgas radiais e axiais que comprometem a qualidade dos furos obtidos.

Furadeiras elétricas apresentam torque mais elevado em relação às turbinas pneumáticas e uma limitação quanto à rotação máxima, normalmente inferior a 90.000 rpm. A vantagem mais importante está no tipo de energia utilizada, mais facilmente disponível.

Considerando estas características, decidiu-se pelo uso de duas furadeiras acionadas pneumaticamente.

A primeira, modelo Hi-Rite, opera a uma rotação de 320.000 rpm e tem uma folga radial máxima de 20  $\mu\text{m}$ . Esta *furadeira*(5.6) tem o corpo cônico, de forma que uma *camisa de aço*(5.2) teve de ser construída para o acoplamento com a guia de furação cilíndrica.

A segunda furadeira, modelo Air Motor, opera à rotação de 60.000 rpm e a especificação de folga radial é a mesma do modelo anterior. O corpo desta furadeira é cilíndrico, o que vem a ser um aspecto construtivo vantajoso considerando o

---

<sup>59</sup> O sistema desenvolvido pela Micromasurements Group (MM) utiliza uma furadeira especial, que lhe é fornecida com exclusividade pelo fabricante.



acoplamento com a guia de furação.

Quanto às ferramentas de corte, ensaios utilizando vários tipos de brocas, apontam que o uso das brocas fornecidas pelo fabricante Micromasurements são mais adequadas do que as de uso odontológico. Esta vantagem é mais acentuada na usinagem de furos maiores ou de materiais mais duros. Ambos os tipos são revestidos com nitreto de titânio.

#### **7.2.5.2 Guia de Furação e Conjunto Micrométrico de Controle de Avanço**

A furadeira deve ser guiada durante o processo de furação para que as tolerâncias geométricas do furo sejam ultrapassadas. Considerando que, em alguns casos, o furo será executado em passos, foi necessário implementar um sistema que permitisse um controle da profundidade de avanço. O sistema apresenta uma resolução de um centésimo de milímetro e a incerteza do passo de furação é da ordem de dois centésimos de milímetro.

A furadeira desliza numa *guia cilíndrica*(5.1) que consiste de um corpo de alumínio e uma bucha interna de bronze.

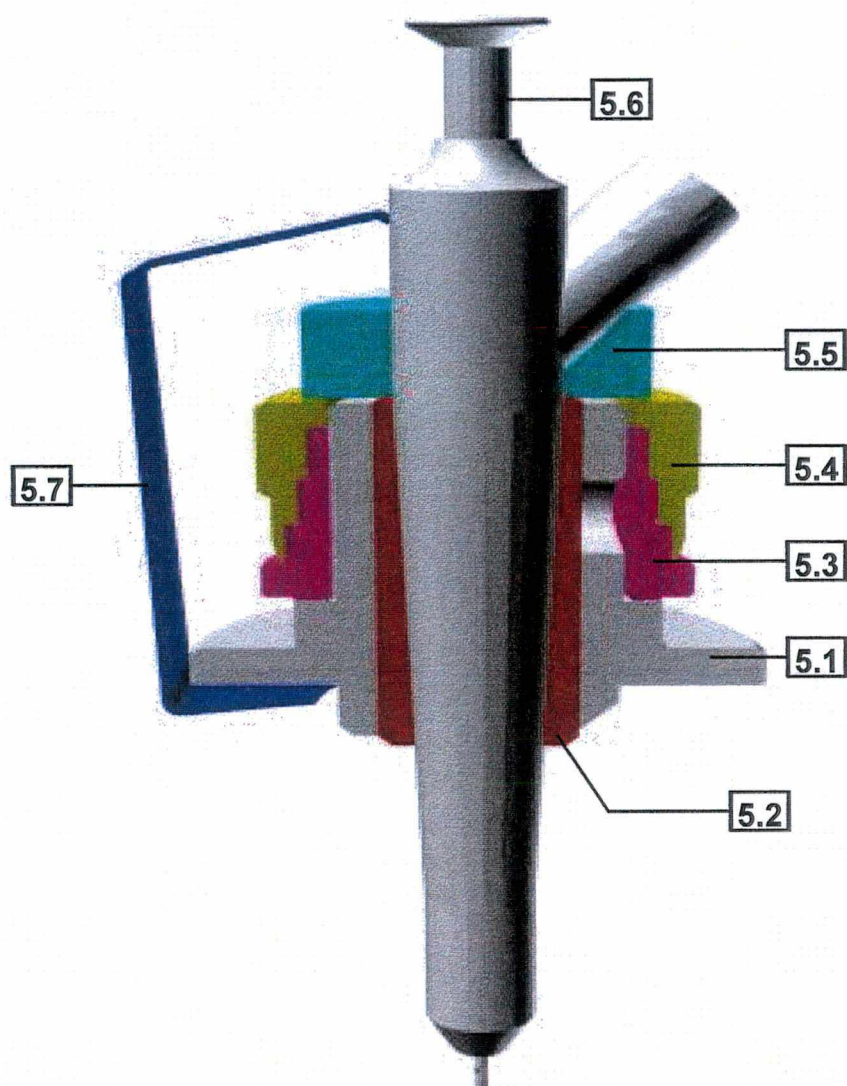
O controle de profundidade do furo é feito através de um *colar "micrométrico" fixo*(5.3) e outro *colar móvel* (5.4), funcionando como um batente mecânico.

Uma *mola*(5.7) especial assegura a existência de uma força empurrando a furadeira durante o processo de furação. Normalmente o uso desta mola é desnecessário, cabendo ao operador do sistema controlar a força e a velocidade de avanço.

#### **7.2.5.3 O Sistema de Furação - Vistas de Conjunto**

A Figura 7.7 mostra os componentes do sistema de furação em corte, a Figura 7.8 é uma vista explodida do sistema e, finalmente, a Figura 7.9 apresenta o sistema de furação montado.

A Tabela 7.6 descreve os componentes do sistema de furação.



**5.1 Guia Cilíndrica Externa**

**5.2 Camisa de Guia**

**5.3 Colar Micrométrico (fixo)**

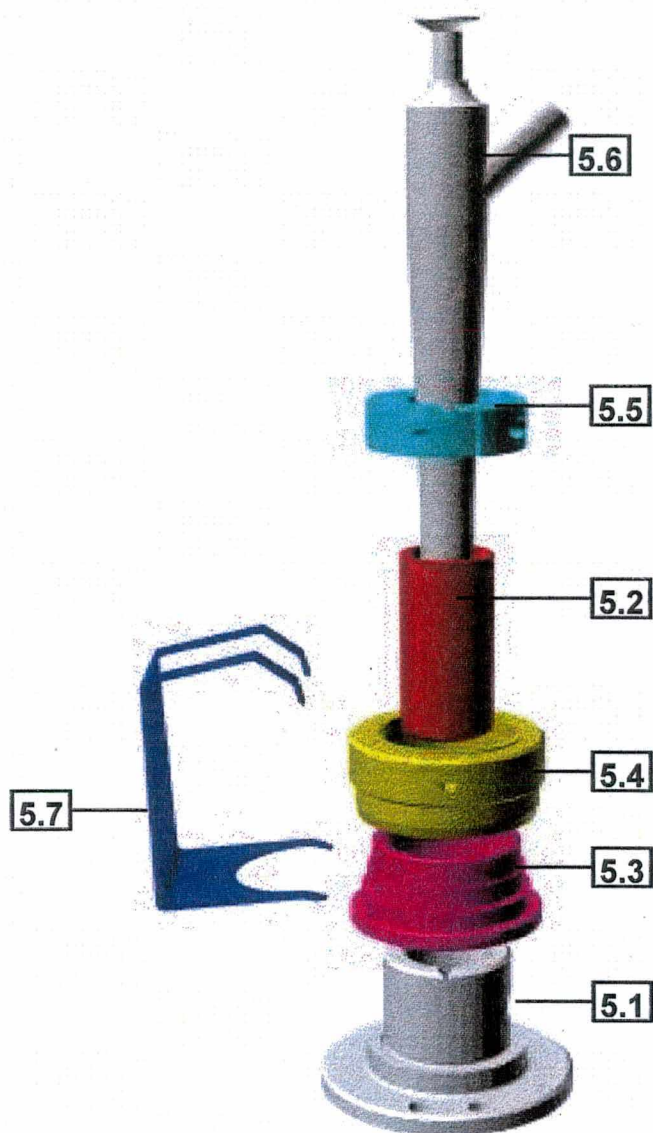
**5.4 Colar Micrométrico (móvel)**

**5.5 Colar de Apoio**

**5.6 Furadeira Pneumática**

**5.7 Mola**

*Figura 7.7 - Sistema de furação (vista em corte)*



**5.1 Guia Cilíndrica Externa**

**5.2 Camisa de Guia**

**5.3 Colar Micrométrico (fixo)**

**5.4 Colar Micrométrico (móvel)**

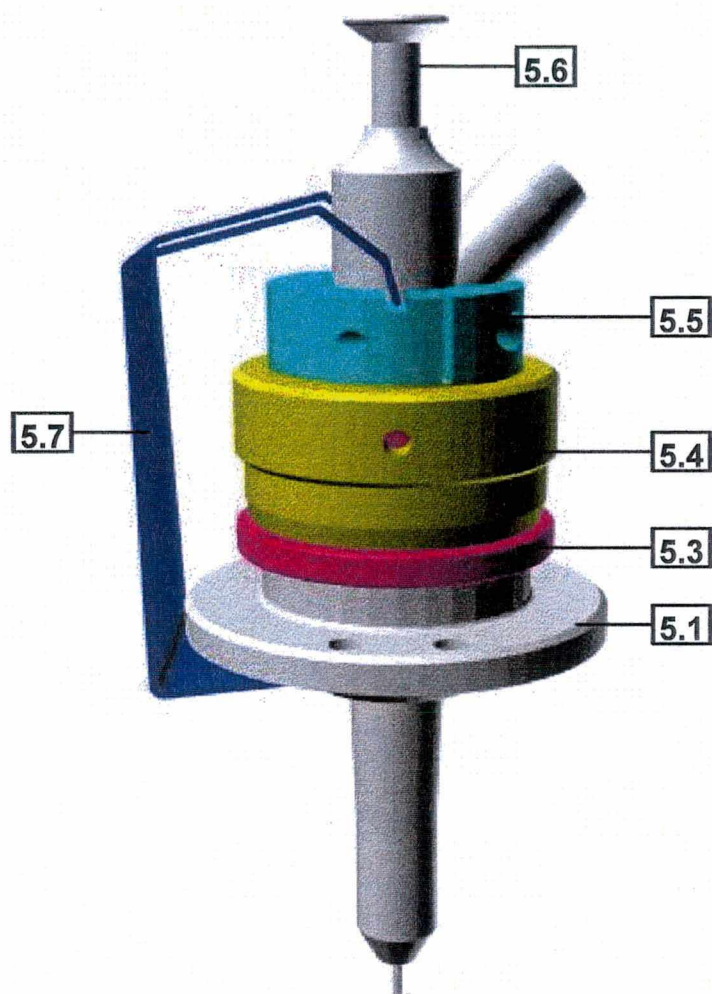
**5.5 Colar de Apoio**

**5.6 Furadeira Pneumática**

**5.7 Mola**

Figura 7.8 - Vista explodida do sistema de furação





**5.1 Guia Cilíndrica Externa**

**5.2 Camisa de Guia**

**5.3 Colar Micrométrico (fixo)**

**5.4 Colar Micrométrico (móvel)**

**5.5 Colar de Apoio**

**5.6 Furadeira Pneumática**

**5.7 Mola**

*Figura 7.9 - Conjunto de furação montado*

Numeração	Denominação	Quantidade
5.1	Guia Cilíndrica	01
5.2	Camisa de Guia	01
5.3	Colar Micrométrico (fixo)	01
5.4	Colar Micrométrico (móvel)	01
5.5	Colar de Apoio	01
5.6	Furadeira Pneumática de Altíssima Rotação	01
5.7	Mola	

*Tabela 7.6 - Componentes do sistema de furação*

#### **7.2.6 Sistema de Deslocamento de Fase**

Através deste sistema, a diferença de fase entre os raios que interferem junto à superfície da peça é alterada em passos correspondentes à frações do comprimento de onda da luz utilizada. As imagens associadas a cada deslocamento na fase são armazenadas e, usando de um processamento matemático posterior, a fase absoluta do padrão de interferência inicial é calculada.

O deslocamento de fase relativo entre os raios que interferem pode ser implementado a partir de vários métodos. A translação de um componente do sistema óptico através de um transdutor piezoelétrico tem sido um dos mais utilizados.

Idealmente o sistema de deslocamento de fase deve ser leve, automatizado, repetitivo e linear.

Contudo, por limitações técnicas, estes requisitos dificilmente são todos cumpridos. Em geral, mesmo PZTs de boa qualidade apresentam um desvio de linearidade que pode variar de menos de 1% até 3%. Como os PZTs apresentam ainda uma certa histerese e um *drift* térmico superpostos, o desvio de linearidade não será repetitivo. Finalmente, o deslocamento do transdutor pode não ser constante ao



longo do diâmetro.

Além dos erros associados ao transdutor piezoelétrico, outras fonte contribuem na incerteza do deslocamento de fase:

- não linearidades do sensor CCD da câmera de vídeo, além do ruído associado ao sinal de saída e ruído de quantização;
- instabilidades da fonte de luz;
- vibrações mecânicas<sup>[79]</sup>;
- flutuações aleatórias na fase do padrão de interferência.

Considerando estes aspectos, além de um sistema cujos erros de posicionamento sejam mínimos e de uma calibração correta, se torna muito importante utilizar um algoritmo adequado de processamento. A seleção deste algoritmo deve ser feita em função do sistema de deslocamento de fase utilizado, da dinâmica da grandeza a ser medida e de influências externas que podem introduzir erros sistemáticos ou aleatórios. Considerando estes fatores, foi desenvolvido um estudo detalhado através de simulação comparando o comportamento de vários algoritmos de processamento quando todo o sistema é submetido a erros típicos. Os resultados deste estudo são apresentados no Anexo 3.

#### **7.2.6.1 Seleção do Transdutor Piezoelétrico**

A maioria dos transdutores piezoelétricos<sup>[80, 81]</sup> utilizados em interferometria e disponíveis no mercado apresenta geometria cilíndrica. Estes transdutores normalmente consistem de uma pilha de vários discos de material piezoelétrico. Nesta configuração, denominada de *multilayer*, os discos estão eletricamente ligados em paralelo, de forma que o deslocamento total corresponde à soma dos deslocamentos individuais de cada disco. A vantagem mais importante neste tipo de montagem é que deslocamentos da ordem de micrometros podem ser alcançados com tensões inferiores a 100 V. Por outro lado, o nível de tensão aplicado deve ser muito bem controlado, uma vez que um erro será multiplicado várias vezes, proporcionalmente ao número de discos que constituem a pilha.

Apesar do uso bastante difundido e das várias geometrias disponíveis, não foi encontrado nenhum transdutor comercialmente disponível que se adequasse ao uso com o interferômetro radial proposto neste trabalho no sentido de formarem um conjunto compacto e robusto.

A concepção ideal consiste de um transdutor anular, montado entre os espelhos cônicos do interferômetro radial. Para tanto, o diâmetro interno deve ser superior ao maior diâmetro do interferômetro radial e a altura não ultrapassar 3 mm. Várias empresas foram consultadas sobre a possibilidade de fabricação de um transdutor *multilayer* com tais características. Infelizmente a maioria dos fabricantes declinou, justificando que a produção de tal anel não seria viável economicamente em função da pequena quantidade solicitada.

Entretanto, foi apresentada pelo fabricante American Piezo Ceramics uma alternativa que consiste de um anel *single-layer* polarizado radialmente, através do qual é possível atingir, às custas de tensão e altura maiores, quase os mesmos níveis de deslocamento do modelo solicitado inicialmente. A tecnologia *single-layer* difere da anterior pela existência de apenas um “grande” disco piezoelétrico, que simplifica bastante o processo de fabricação.

A expansão axial de um anel *single-layer* é determinada pela seguinte equação:

$$\Delta L = \frac{2\Delta V_{el} \cdot h \cdot d_{31}}{(D_e - D_i)} \quad (7.1)$$

onde:

$\Delta L$  é a variação no comprimento [ $\mu\text{m}$ ]

$\Delta V_{el}$  é a variação de tensão aplicada, considerando o estado inicial [V]

$h$  é a altura do anel [mm];

$d_{31}$  é a constante piezoelétrica axial do material [ $\mu\text{m/V}$ ]

$D_e$  é o diâmetro externo do anel [mm];

$D_i$  é o diâmetro interno do anel [mm].

Superposta à deformação axial, existe também uma expansão radial, dada por:

$$\Delta r = \Delta V \cdot d_{33} \quad (7.2)$$



onde:

$\Delta r$  é a expansão radial [ $\mu\text{m}$ ]

$\Delta V$  é a variação de tensão aplicada [V]

$d_{33}$  é a constante piezoelétrica radial do material [ $\mu\text{m/V}$ ]

Para o anel utilizado, considerando uma tensão de 150 V, a expansão radial é de aproximadamente, 0,09  $\mu\text{m}$ .

Embora não seja a configuração ideal, este anel *single-layer* ainda permite a construção de um sistema compacto, robusto e significativamente mais barato do que se fosse utilizada a tecnologia *multi-layer*.

O transdutor desenvolvido para o protótipo consiste de um anel(6.1) de 10 mm de altura e diâmetros externo e interno de 35 e 34 mm, respectivamente. O material (PZT5H) tem constante piezoelétrica axial de  $270 \cdot 10^{-6} \mu\text{m/V}$  e radial de  $590 \cdot 10^{-6} \mu\text{m/V}$ . Para esta configuração, ficam estabelecidas, respectivamente, expansões nominais axial e radial, de  $\pm 0,8 \mu\text{m}$  e  $\pm 0,09 \mu\text{m}$ , para tensão de  $\pm 150 \text{ V}$ .

A fixação do anel piezoelétrico ao interferômetro é um fator crítico. Devido à superposição da expansão radial, o transdutor não deve ser colado ao longo de todo seu perímetro à superfície do espelho cônico. A fixação em três pontos defasados de  $120^\circ$  é suficiente. Também é importante que a cola não seja aplicada sobre toda a espessura do anel, mas, preferencialmente, apenas na interface entre a superfície da peça e a face interna do anel piezoelétrico. Procedimentos distintos destes podem levar a um comportamento do transdutor diferente do especificado ou mesmo danificá-lo.

#### 7.2.6.2 Acionamento e Controle do PZT

O controle do transdutor piezoelétrico é feito através de um *circuito de chaveamento* (6.3) e uma *placa com conversão D/A e A/D*(6.4) montadas na unidade central. O PZT é acionado através de um *amplificador*(6.2) de alta tensão, cujo sinal de saída pode chegar até 1000 V.

O sinal digital para deslocamento do transdutor é gerado no microcomputador,

convertido para um sinal analógico que varia entre 0 e 150 mV e enviado ao amplificador. O amplificador utilizado permite um sinal de entrada que pode variar entre 0 e 1V. Através de um circuito de chaveamento de alta tensão que permite a inversão da tensão de saída do amplificador, o transdutor pode ser operado tanto com polarização direta como reversa.

No Anexo 2 é mostrado o circuito de chaveamento do pzt.

A Tabela 7.7 apresenta os componentes do sistema de deslocamento de fase.

Numeração	Denominação	Quantidade
6.1	Anel Piezoelétrico	01
6.2	Amplificador de Alta Tensão*	01
6.3	Circuito de Chaveamento*	01
6.4	Placa A/D D/A*	01

\* componentes montados na unidade central de processamento e controle

*Tabela 7.7 - Componentes do sistema de deslocamento de fase*

### **7.2.6.3 Algoritmos de Processamento**

A literatura apresenta vários algoritmos de processamento, que diferem em função do número de imagens e da ordem em que estas são consideradas nos cálculos. O algoritmos mais utilizados são baseados no processamento de quatro imagens, correspondentes a deslocamentos de fase de 90°.

Entretanto, por limitações e dúvidas quanto ao funcionamento do anel piezoelétrico, procurou-se desenvolver e analisar outros algoritmos de processamento, os quais utilizassem menor quantidade de imagens ou exigissem menores ângulos de deslocamento de fase.

Um estudo detalhado é apresentado no Anexo 3. Os resultados apontam os



algoritmos mais adequados para serem usados com o interferômetro radial. A decisão pela escolha entre cada um deles recai sobre propriedades do sistema de deslocamento de fase e das condições<sup>60</sup> em que será realizado o ensaio de medição de tensões residuais.

Como regra geral, pode-se afirmar o seguinte:

- a) Para imagens que apresentem modulação muito baixa ou para um transdutor cujo desvio de linearidade seja pequeno ( $<2\%$ ) ao longo de toda faixa de operação utilizada, os algoritmos de quatro passos e, especialmente o algoritmo de cinco passos proposto por Schwider apresentam os melhores resultados devido à minimização dos efeitos aleatórios. O algoritmo de Carré é especialmente indicado quando o comportamento do sistema óptico é tal que o deslocamento de fase é repetitivo, porém não é constante ao longo do diâmetro da região de iluminação.
- b) Quando o deslocamento de fase é afetado por erros sistemáticos consideráveis, como por exemplo um desvio de linearidade do transdutor piezoelétrico superior a 5%, ou ainda, quando por características construtivas, o deslocamento do transdutor é limitado, algoritmos de três passos defasados de  $90^\circ$ . Caso o comportamento do sistema de deslocamento de fase não seja homogêneo ao longo do diâmetro, o algoritmo de três passos proposto por Viskram et al.<sup>[82]</sup> é mais indicado.

De qualquer modo, a aquisição pode ser feita vários passos e as imagens processadas segundo cada um dos algoritmos. O algoritmo de processamento mais adequado para uma determinada medição pode ser determinado através da análise do ruído dos mapas de fase resultantes, da modulação individual dos pixels, entre outros fatores.

Um fato muito importante apresentado no Anexo 3, é a influência dos pixels com baixo coeficiente de modulação sobre o erro no cálculo do ângulo de fase.

---

<sup>60</sup> Vibrações mecânicas (frequência e amplitude) e estabilidade térmica são as condições determinantes.



### 7.2.7 Estrutura Monobloco

Embora seja apresentada por último, a estrutura monobloco é o subsistema mais importante de todo o protótipo. O dimensionamento do monobloco foi feito considerando a necessidade de integração dos demais subsistemas, além de requisitos não menos críticos como robustez e redução da massa e dimensões externas.

A fabricação de uma estrutura única, tipo monobloco, foi decidida a partir dos resultados de simulações numéricas e de ensaios experimentais.

A geometria inicialmente proposta no capítulo 6 foi otimizada, considerando:

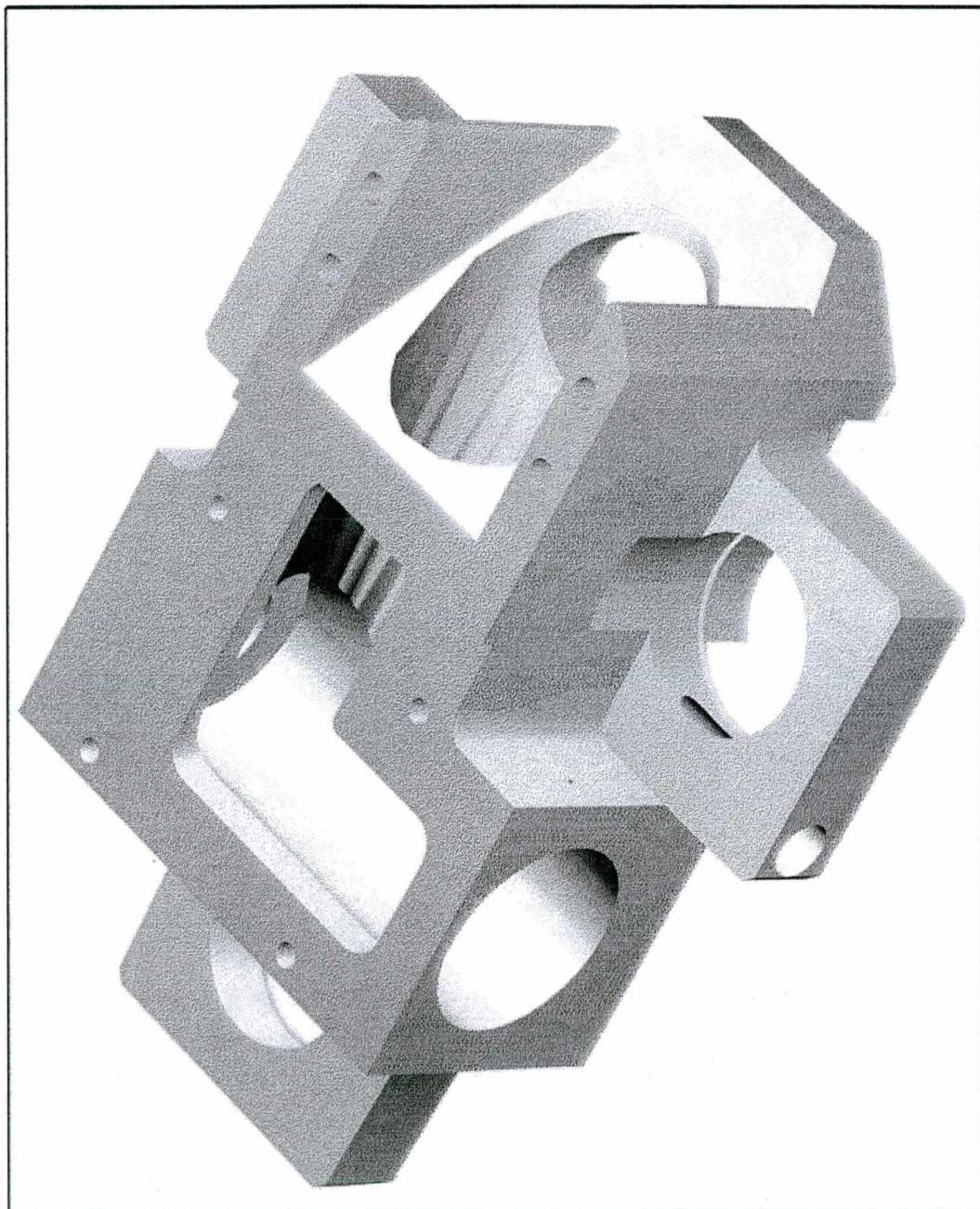
- melhorar as condições de acesso a cantos, através do posicionamento do interferômetro radial mais próximo a uma das extremidades da estrutura;
- diminuição do caminho óptico de expansão da luz;
- integração dos sistemas de furação e visualização, no sentido de diminuir o número de elementos móveis e as dimensões do conjunto;
- integração do sistema de fixação;
- facilitar a montagem e ajuste dos componentes do sistema de iluminação, desde o acoplamento da fibra óptica até a expansão e colimação da luz;
- redução da altura do centro de massa do sistema, através da redistribuição dos componentes críticos;
- possibilidade de futura integração de um laser-diodo em substituição ao sistema hoje existente.

O monobloco foi fabricado a partir de alumínio aeronáutico, que reúne propriedades como alta resistência, pequena massa específica quando comparado a outros metais, não magnético e boa usinabilidade<sup>[83]</sup>. Embora aparentemente complexo, sua fabricação é simples, mesmo a partir de usinagem convencional.

Além da *estrutura*(7.1) propriamente dita, uma *tampa*(7.2) para ajuste dos componentes do sistema de iluminação também compõe o sistema

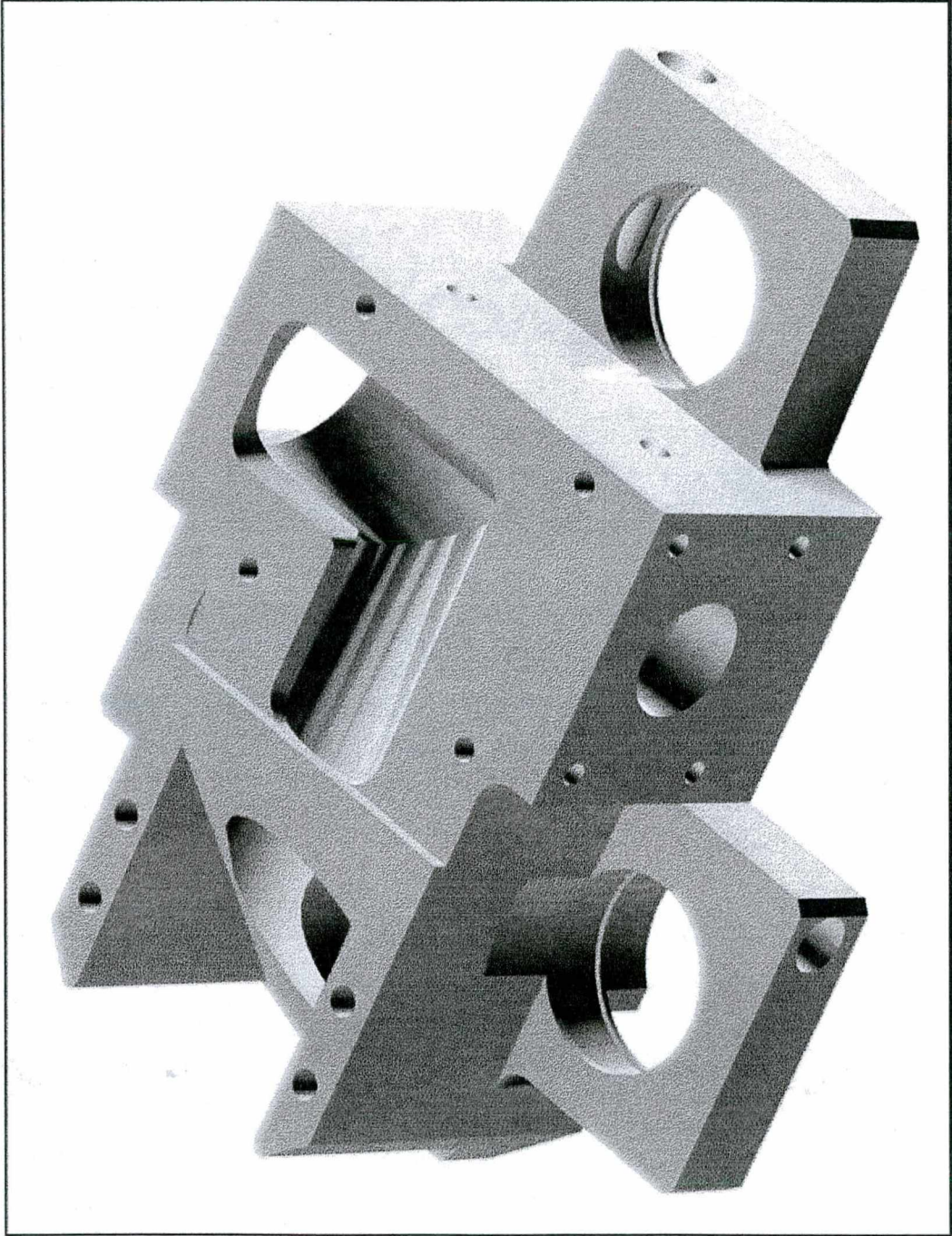
A Figura 7.10 e a Figura 7.11 mostram em detalhe a estrutura monobloco.

A Tabela 7.8 descreve os componentes deste subsistema



*Figura 7.10 - Estrutura monobloco*





*Figura 7.11 - Estrutura monobloco*

Numeração	Denominação	Quantidade
7.1	Monobloco	01
7.2	Tampa	01

Tabela 7.8 - Componentes da estrutura monobloco

7.2.8 O Sistema de Medição - Vistas de Conjunto

As figuras a seguir mostram o protótipo do cabeçote do sistema de medição de tensões residuais usando a holografia e o método do furo cego.

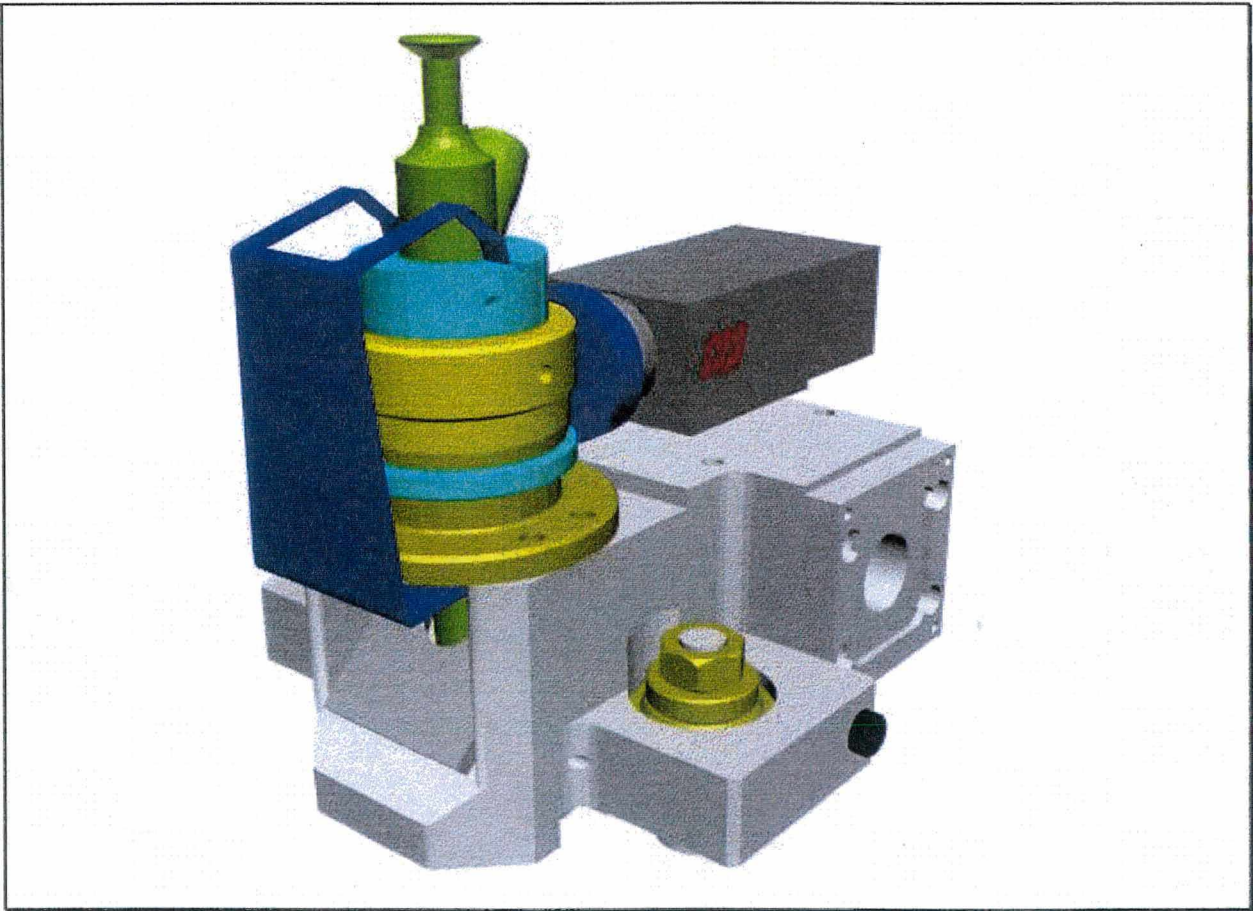


Figura 7.12 - Conjunto montado (situação de furação)



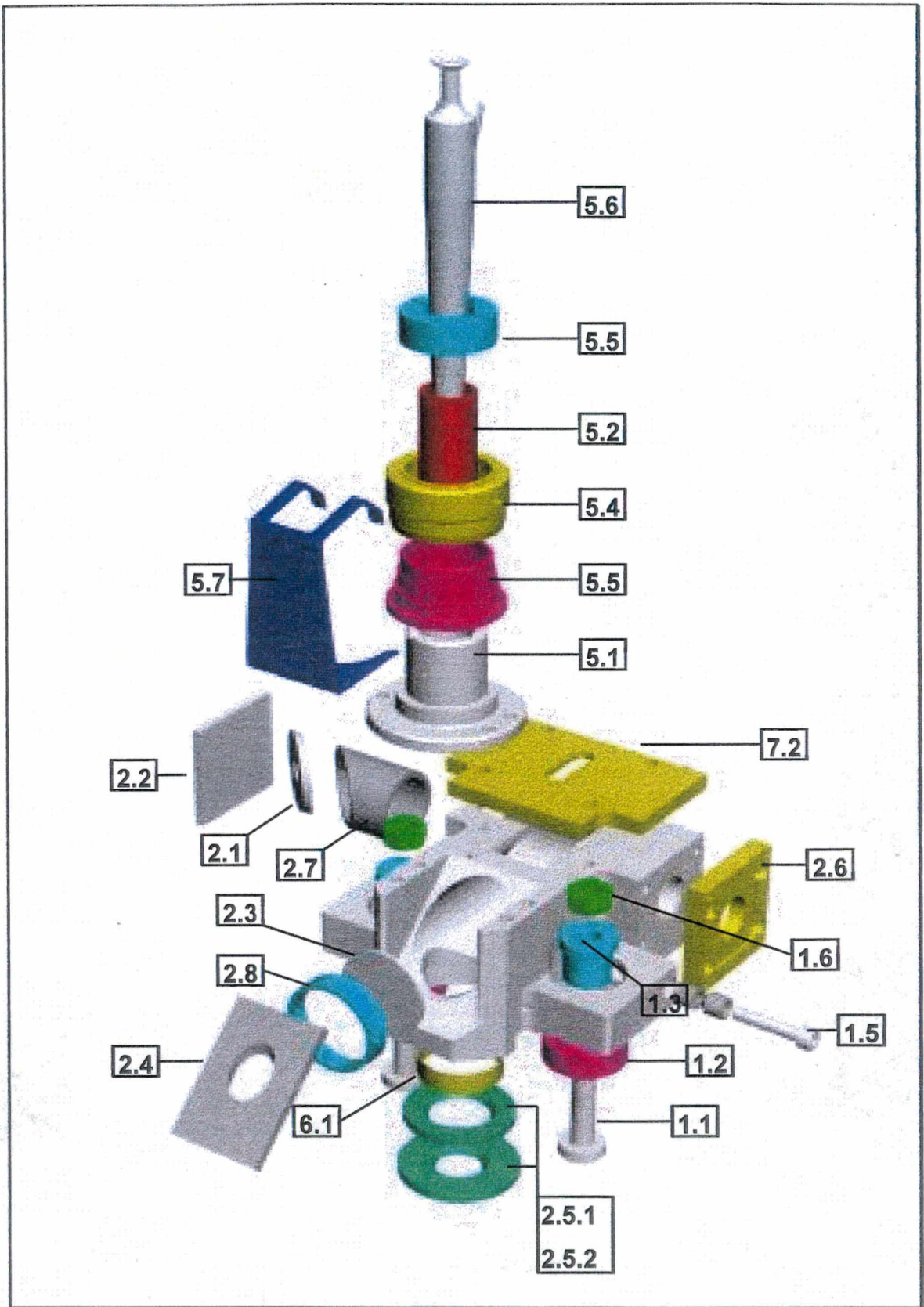


Figura 7.13 - Vista explodida do conjunto na situação de furação



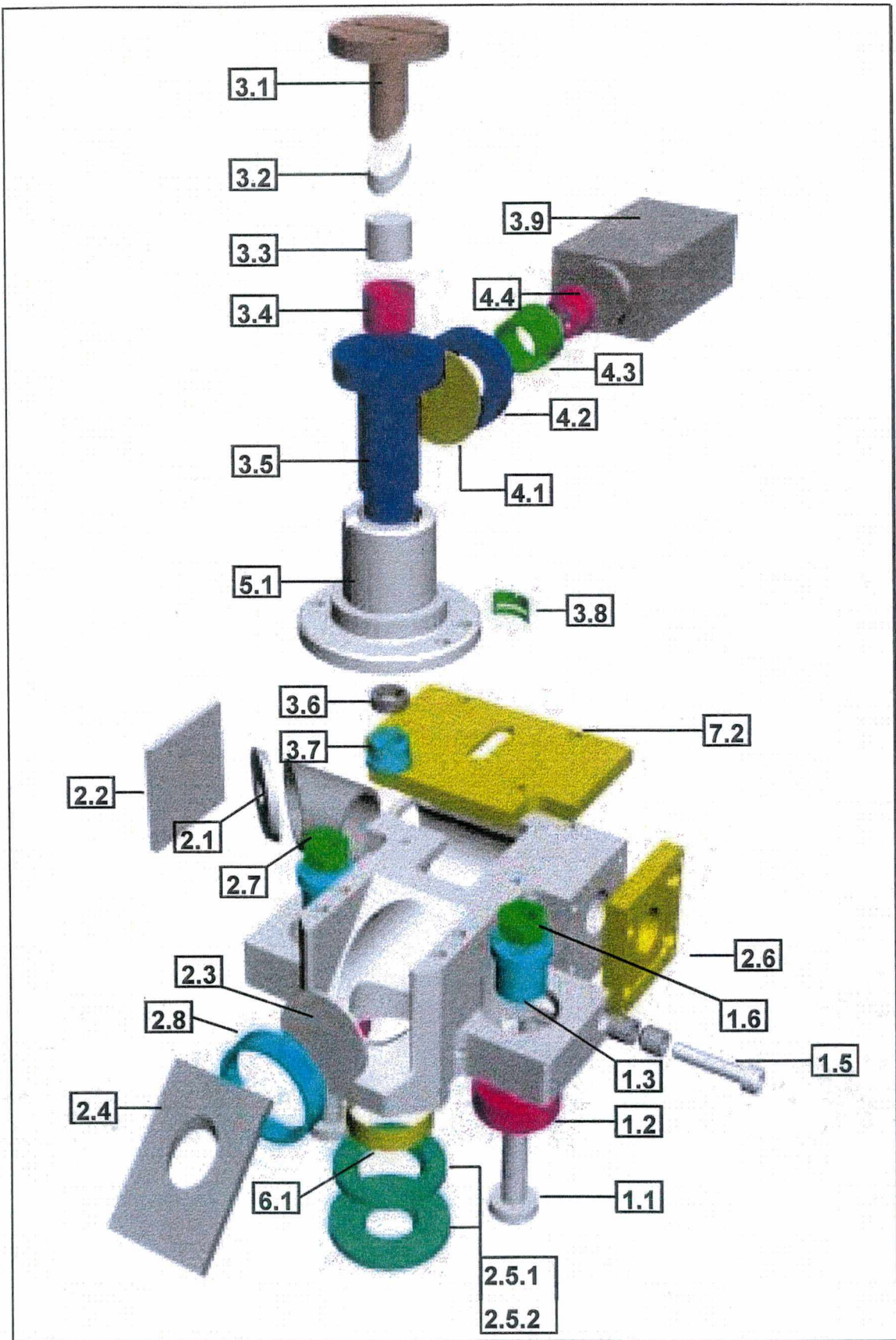


Figura 7.14 - Vista explodida do conjunto na situação de aquisição

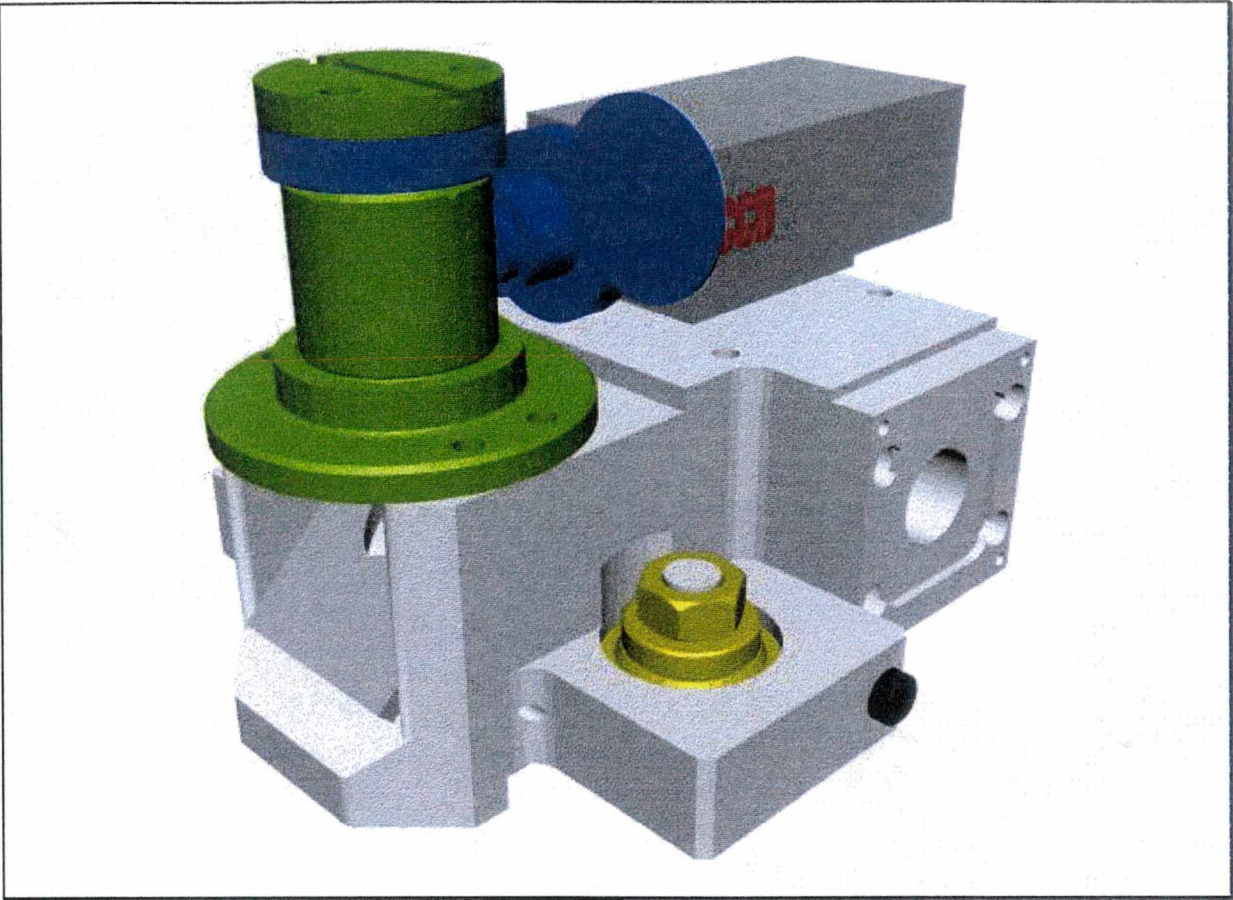


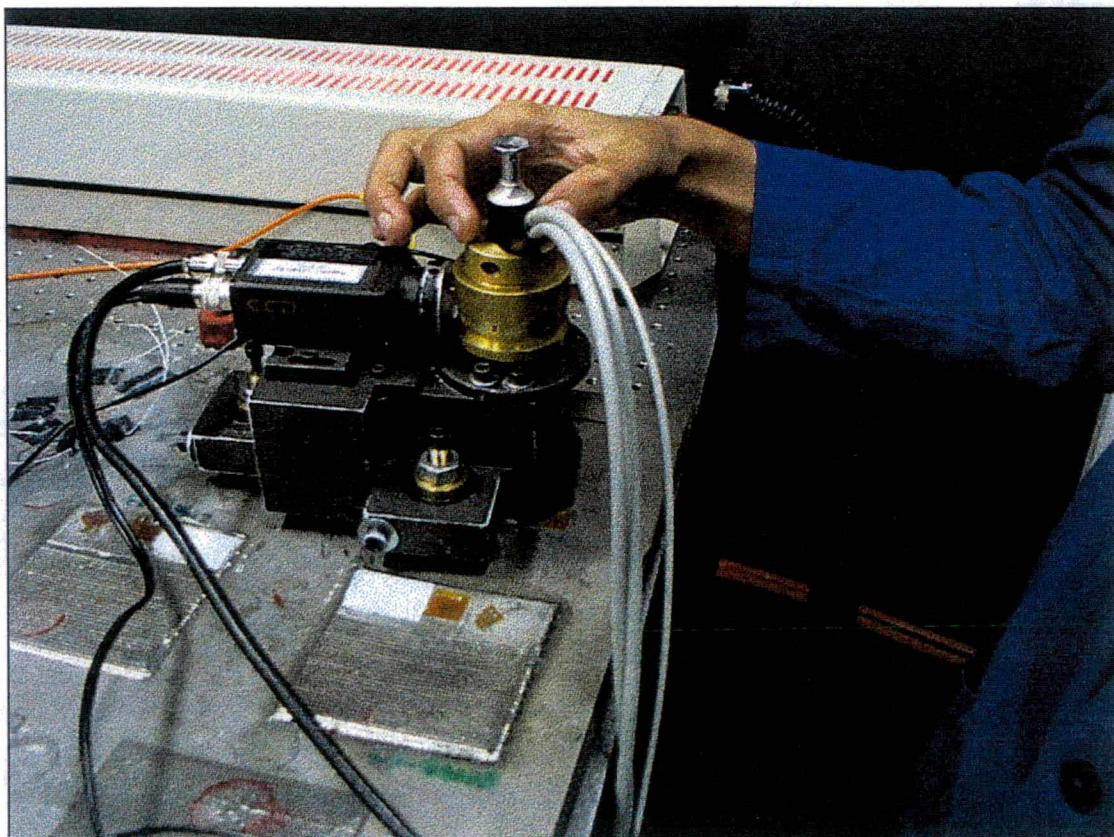
Figura 7.15 - Conjunto montado (situação de aquisição de imagens)



## 8. Resultados Finais, Conclusões Gerais e Recomendações

Um conjunto de espelhos cônicos bipartidos foi produzido na Universidade Técnica de Aachen (Alemanha) especialmente para o protótipo. Embora com excelente geometria, a qualidade do material usado para produzir os espelhos continha impurezas que reduziram a qualidade da iluminação da peça a medir. A superfície do espelho foi recoberta com uma nova camada de alumínio para reduzir o problema. Finalmente, um novo polimento com abrasivo fino foi realizado em torno de precisão, o que melhorou o comportamento global do espelho.

O conjunto de anéis piezelétricos foi operacionalizado e testado. Devido às características destes anéis, tensão de trabalho entre  $-150\text{ V}$  à  $+150\text{ V}$ , foi desenvolvido um circuito elétrico de forma a permitir inverter a polaridade da tensão de saída da fonte de alimentação para aproveitar toda a faixa de operação do anel.



*Figura 8.1 - Protótipo operacionalizado do MATER (situação de furação)*

Os componentes foram fabricados e o protótipo montado. Na Figura 8.1 é mostrada uma foto do cabeçote de medição na situação de furação.

Alguns ajustes e pequenas modificações foram necessárias para operacionalizar o sistema. Foi preciso modificar a forma de fixação do espelho cônico no anel piezelétrico para evitar deformações da superfície espelhada devido à expansão radial do anel piezelétrico. Problemas adicionais com a deposição de cavaco na região do furo foram minimizados com o uso de uma cobertura de borracha acrescentada nas proximidades da broca. Os primeiros experimentos mostraram grande parcela de histerese no movimento do espelho cônico. Este efeito foi compensado por meio de um algoritmo especial implementado no software de aquisição. A qualidade dos primeiros mapas de fase foi inferior à qualidade dos mapas obtidos em testes anteriores. Após a introdução de pequenas ações corretivas a qualidade dos mapas foi sensivelmente melhorada.

Com a finalidade de avaliar a estabilidade do protótipo contra vibrações, o protótipo foi instalado sobre a superfície de uma chapa de aço suspensa por meio de molas. A fixação na chapa foi efetuada de forma usual por meio de cola. As franjas de interferência permaneceram estáveis, mesmo para elevadas amplitudes de vibração. Foram aplicados movimentos vibratórios de relativamente baixa frequência normais, transversais e torcionais. Quando choques mecânicos foram aplicados sobre a chapa (vibrações de elevada frequência) as franjas desapareceram por cerca de meio segundo para reaparecer logo em seguida. Ao retirar e reposicionar o conjunto óptico as franjas de interferência voltavam a se formar normalmente. Houve certa perda da qualidade das franjas durante o ciclo de retirada do conjunto óptico/instalação do conjunto de furação/acionamento da furadeira/retirada do conjunto de furação/instalação do conjunto óptico. Este efeito deve estar sendo intensificado pelos inevitáveis pequenos choques na estrutura do protótipo provocado pela retirada e remoção destes conjuntos, indicando que há ainda algum elemento (até agora não identificado) cuja estabilidade mecânica precisa ser melhorada.



Foram realizados alguns testes<sup>61</sup> em um corpo de prova recozido de aço 1020. Este corpo de prova foi submetido a um carregamento em uma máquina de tração, monitorado por extensômetros de resistência. Houve dificuldades em fixar o protótipo sobre a área de medição no corpo de prova devido ao seu tamanho reduzido. Alguns problemas de instabilidade e perda de correlação devido à falta de rigidez da fixação e à baixa qualidade superficial do espelho cônico foram observados durante os testes. Mapas de fases para a quantificação das tensões residuais foram obtidos, porém, a baixa qualidade destes mapas não conduziram a bons resultados quantitativos. Em função disto, o conjunto espelho cônico e anel piezelétrico foi substituído por um novo conjunto com qualidade melhor bem como foi implementada uma montagem mais rígida. Resultados preliminares obtidos em novos experimentos já mostravam uma melhora da qualidade dos mapas. Outros testes foram feitos em uma chapa de aço inox fixando o protótipo diretamente sobre esta superfície. Os mapas de fases obtidos nestes testes apresentaram qualidade satisfatória.

O protótipo desenvolvido mostrou uma série de aspectos positivos considerando os objetivos iniciais de portabilidade e robustez. Contudo, os primeiros testes experimentais evidenciaram alguns problemas que devem ser corrigidos:

- algum elemento da cadeia de fixação (a ser identificado) pode ter a rigidez/estabilidade mecânica melhoradas.
- o atuador piezelétrico usado, formado por um anel de cerâmica apresentou elevada histerese e grande deformação diametral proporcionalmente à deformação axial desejada, limitando a faixa de operação. Estas características negativas fogem às especificações determinadas pelo fabricante dos anéis, devendo ser investigadas com maior profundidade.
- as sapatas que fixam as rótulas não se destravam por completo quando liberadas pelos parafusos-trava. O projeto das sapatas deve ser melhorado para facilitar o destravamento.
- a mola de compressão do sistema de furação deve ser redimensionada, de

---

<sup>61</sup> Testes experimentais mais completos, avaliando o comportamento metrológico e funcional do protótipo, serão apresentadas futuramente em outra dissertação de mestrado que está sendo desenvolvida no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Santa Catarina.

forma a garantir uma pressão adequada mesmo quando o conjunto for utilizado na posição sobre-cabeça.

- na situação de medição do furo, ocorre a formação de sombras no seu contorno, podendo dificultar a medição.

Como sugestões de atividades futuras, visando eliminar os problemas identificados acima, destacam-se as seguintes:

- através de uma pesquisa profunda de materiais e processos de fabricação, buscar a melhora da qualidade dos espelhos cônicos do interferômetro radial.
- estudo do sistema de deslocamento de fase, considerando as seguintes providências:
  - determinação junto ao fabricante das causas do comportamento do espelho fora das especificações técnicas;
  - aumento da altura do anel piezeoelétrico, de forma a aumentar a deformação axial
  - no caso de fabricação seriada ou de um número maior de unidades do protótipo, justificar-se-ia a utilização de um anel com tecnologia *multilayer*.
- o sistema de travamento das rótulas diretamente através de parafusos, tal como apresentado no item 7.2.1 deve ser implementado, a fim de comparar a rigidez de fixação com a concepção hoje utilizada. Teoricamente, além de se eliminar o problema anterior, obter-se-á uma fixação mais eficiente, considerando que as rótulas são travadas contra as paredes do monobloco;
- melhorar o sistema de reposicionamento das lentes de observação da região de medição;
- implementar um sistema de fixação por princípios magnéticos, através de ímãs terras-raras,
- a mola de fixação dos conjuntos removíveis no protótipo (furadeira, joelho óptico e lupa) deve ser redimensionada ou substituída por um sistema mais eficiente de fixação;
- o atual sistema de iluminação deverá ser modificado. Um laser diodo pode ser usado como fonte de luz, trazendo vantagens como aumento da robustez

do sistema, redução de custos, e possibilidade de implementação de um sistema de deslocamento de fase diretamente através da modulação do laser, eliminando a necessidade de utilizar anéis piezoelétricos,

- adicionalmente, um sistema de luz branca poderá vir a ser introduzido para melhorar as condições de medição do diâmetro do furo executado;
- otimização da estrutura monobloco, procurando reduzir sua massa, tornando todo o cabeçote de medição mais leve.

## ANEXO 1

### **Procedimento de Cálculo das Incertezas dos Deslocamentos Radiais de Referência no Experimento de Validação do Princípio do Interferômetro Radial**

O deslocamento radial de referência, ponto a ponto, é determinado pela equação:

$$d_{ref}(x, y, raio, \alpha, d_{sim}, L) = \frac{\sqrt{(x + raio \cos \alpha)^2 + (y + raio \sin \alpha)^2}}{L} d_{sim} \cos \left[ \pi + \arctan \left( \frac{y + raio \sin \alpha}{x + raio \cos \alpha} \right) + \arctan \left( \frac{x}{y} \right) \right] \quad (A1. 1)$$

onde:

$d_{ref}$  : é o deslocamento radial de referência, ponto a ponto

$x, y$  : coordenadas cartesianas do ponto

$raio$  : eixo determinado pelo centro do interferômetro e centro de rotação (mancal)

$\alpha$  : inclinação angular do  $raio$

$d_{sim}$  : deslocamento efetivamente medido na extremidade da barra

$L$  : comprimento da barra onde está sendo medido o  $d_{sim}$

As combinação dos efeitos devido às incertezas individuais associadas a cada uma destas variáveis determina a incerteza do deslocamento de referência, que pode ser calculada por:

$$\Delta d_{ref} = \sqrt{\left( \frac{\partial d_{ref}}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial d_{ref}}{\partial y} \Delta y \right)^2 + \left( \frac{\partial d_{ref}}{\partial raio} \Delta raio \right)^2 + \left( \frac{\partial d_{ref}}{\partial \alpha} \Delta \alpha \right)^2 + \left( \frac{\partial d_{ref}}{\partial L} \Delta L \right)^2 + \left( \frac{\partial d_{ref}}{\partial d_{sim}} \Delta d_{sim} \right)^2} \quad (A1. 2)$$

onde:

$\Delta d_{ref}$  é a incerteza no deslocamento radial de referência, gerado na região de medição do interferômetro radial

$\Delta x$  é a incerteza na determinação da coordenada  $x$



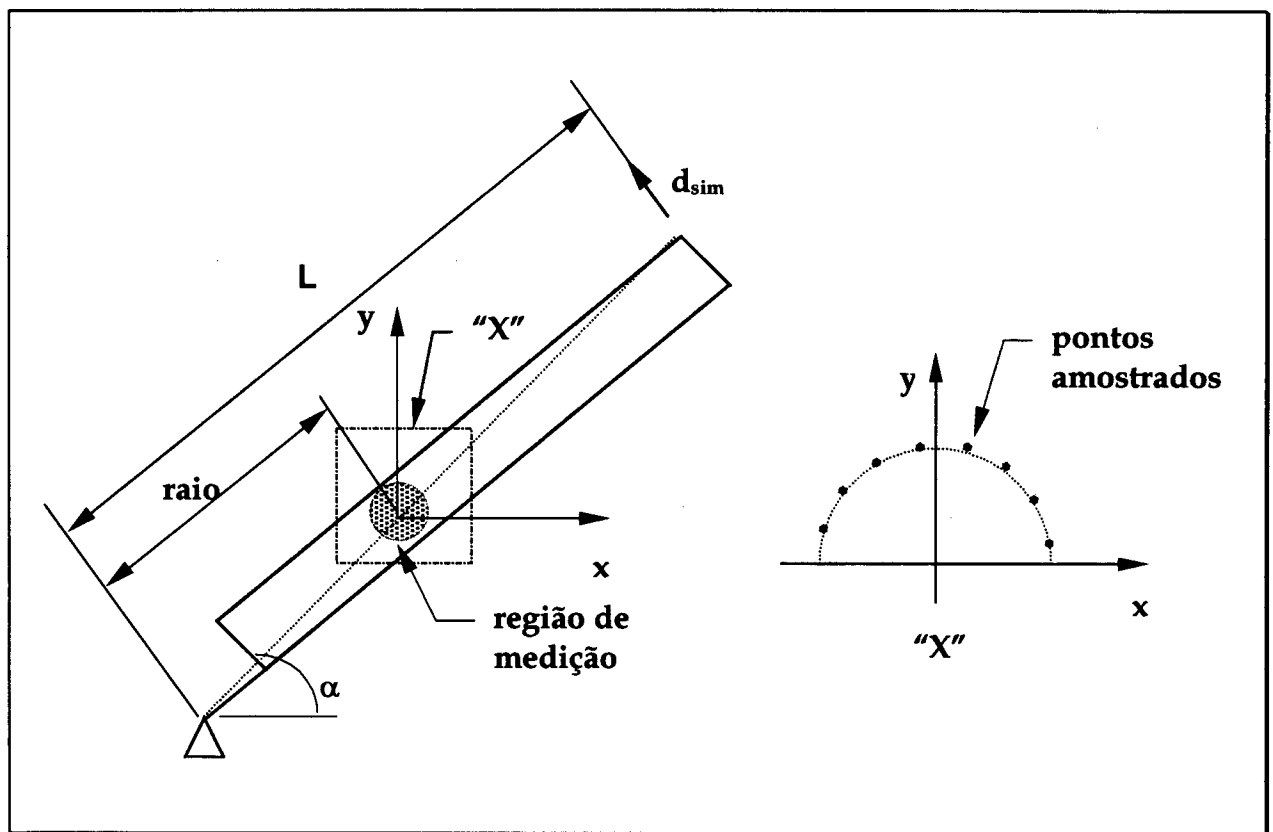
$\Delta y$  é a incerteza na determinação da coordenada  $y$

$\Delta r_{aio}$  incerteza na medição de *raio*

$\Delta \alpha$  incerteza no cálculo do ângulo  $\alpha$

$\Delta L$  incerteza na medição do comprimento  $L$

$\Delta d_{sim}$  incerteza na medição do deslocamento tangencial gerado na extremidade da barra



*Figura A1. 1- Variáveis que determinam o deslocamento radial de referência e disposição dos pontos de amostragem*

As grandezas  $x$  e  $y$  são estatisticamente dependentes, razão pela qual os efeitos das componentes  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são somados algebricamente na equação A1.2.

As demais variáveis são estatisticamente independentes, de forma que a incerteza global é calculada segundo a soma quadrática dos efeitos destas variáveis.

Na Tabela A1. 1 são apresentadas as variáveis e a incerteza associada à cada

uma delas.

Variável		Incerteza	
Símbolo	Faixa / Valor	Símbolo	Valor
$x$	-1,5 a 1,5 mm	$\Delta x$	35 $\mu\text{m}$
	-2,5 a 2,5 mm		
	-3,0 a 3,0 mm		
$y$	0 a 1,32 mm	$\Delta y$	35 $\mu\text{m}$
	0 a 1,66 mm		
	0 a 1,80 mm		
$raio$	100 mm	$\Delta raio$	0,5 mm
$\alpha$	60°	$\Delta \alpha$	0,2 °
$L$	380 mm	$\Delta L$	1 mm
$d_{sim}$	$\approx 3 \mu\text{m}$	$\Delta d_{sim}$	0,05 $\mu\text{m}$

Tabela A1. 1 - Variáveis e incerteza máxima associada

## ANEXO 2

### Circuito de Chaveamento e Controle do Sistema de Deslocamento de Fase

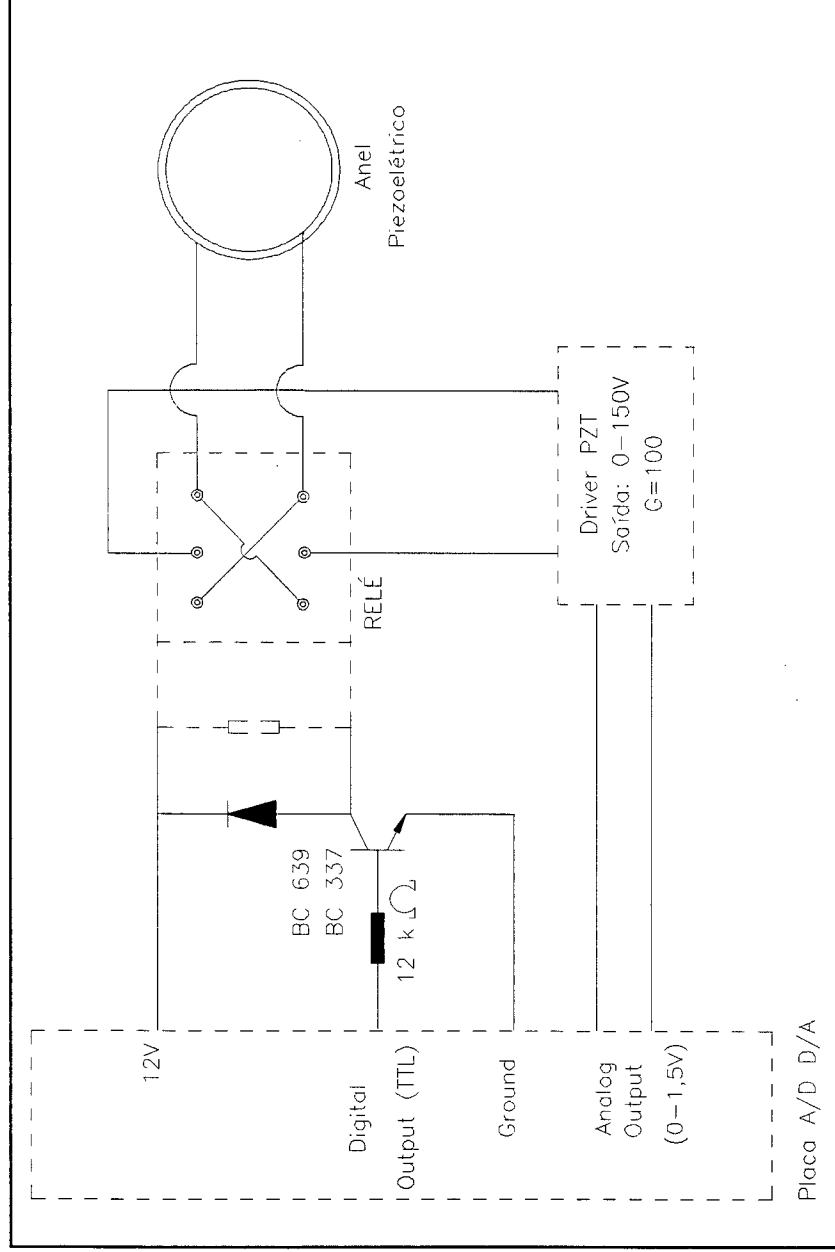


Figura A2. 1 - Circuito de chaveamento do anel piezoeletrico

Observação: um capacitor para supressão de ruído pode ser acrescentado logo na saída do relé

### ANEXO 3

#### **Análise de Algoritmos de Deslocamento de Fase**

Dois feixes de laser coerentes entre si com intensidades  $I_1(x,y)$  e  $I_2(x,y)$  e fases  $\theta_1(x,y)$  e  $\theta_2(x,y)$ , iluminando uma superfície, interferem entre si originando um padrão de speckle dado por  $I_{int}(x,y)$  e  $\theta(x,y)$  que é captado pela câmera CCD. O padrão de speckle resultante é dado por:

$$I_{int(x,y)} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\theta_{(x,y)} \quad (A3. 1)$$

onde:

$\theta(x,y)$  é a diferença de fase entre os feixes 1 e 2.

Considerando que seja aplicado um deslocamento na fase de um dos raios, o novo padrão de speckle pode ser reescrito como:

$$I_{int(x,y)} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta_{(x,y)} + \alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 2)$$

ou

$$I_{int(x,y)} = NF + M \cos(\theta_{(x,y)} + \alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 3)$$

onde:

NF é o nível de fundo dado pelo termo  $I_1 + I_2$

M é a modulação dada pelo termo  $2\sqrt{I_1 I_2}$

O método de deslocamento de fase permite que, através da introdução de deslocamentos angulares conhecidos, seja possível restabelecer o ângulo de fase inicial.

Entretanto, o ângulo de deslocamento de fase  $\alpha_{(x,y)}$  é afetado por erros, devido a efeitos como não-linearidades e calibração incorreta do transdutor piezoelétrico, entre outros.

Além de efeitos aleatórios e sistemáticos superpostos ao deslocamento de



fase<sup>[84, 85]</sup>, os termos NF e M também estão sujeitos à variações ao longo do tempo e do espaço.

Nestas condições, a equação acima pode ser reescrita como:

$$I_{\text{int}}(x,y,t) = NF + \Delta NF + DRIFT + M \cos(\theta_{(x,y)} + \bar{\alpha}_{(x,y)} + \Delta S\alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 4)$$

onde:

$\Delta NF$  é a variação aleatória no nível de fundo, caracterizada por uma distribuição retangular de eventos que por sua vez é definida por um valor central e dois limites, um superior e outro inferior.

DRIFT é a variação temporal no nível de fundo, definida através de uma distribuição normal de eventos

M é a modulação, definida por uma distribuição normal de eventos com média  $\bar{M}$  e desvio padrão  $\sigma_M$ .

$\alpha$  é o deslocamento de fase aplicado, caracterizado por um valor médio  $\bar{\alpha}_{ps(x,y)}$  e por um desvio padrão  $\sigma_\alpha$ .

$\Delta S\alpha_{ps(x,y)}$  efeito sistemático sobre o ângulo de deslocamento de fase.

Considerando a influência dos fatores acima, propõe-se um modelo para simulação com o objetivo de avaliar a adequação de diferentes algoritmos de deslocamento de. Nesta formulação, considera-se a peça num estado de referência, caracterizada por um certo ângulo de fase  $\theta_{ref(x,y)}$ , e numa segunda situação, num estado deformado, caracterizado pelo ângulo de fase  $\theta_{def(x,y)}$ . A diferença entre os ângulos de  $\theta_{def(x,y)} - \theta_{ref(x,y)}$  caracteriza a deformação sofrida, que é a grandeza que se pretende quantificar.

Os algoritmos utilizados na quantificação da fase diferenciam-se pelo número de passos correspondentes a diferentes ângulos de deslocamento de fase e na forma pelo qual os interferogramas são processados.

Consideram-se no estado de referência, os seguintes interferogramas:

$$I_{0ref(x,y)} = NF + \Delta NF_1 + M_1 \cos(\theta_{ref(x,y)}) \quad (A3. 5)$$

(estado de referência)

$$I_{90ref}(x,y) = NF + \Delta NF_2 + M_2 \cos(\theta_{(x,y)} + \bar{\alpha}_{ps(x,y)} + \Delta S\alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 6)$$

(referência com ângulo de fase deslocado em +90°)

$$I'_{90ref}(x,y) = NF + \Delta NF'_2 + M'_2 \cos(\theta_{(x,y)} - \bar{\alpha}_{ps(x,y)} - \Delta S\alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 7)$$

(referência com ângulo de fase deslocado em -90°)

$$I_{180ref}(x,y) = NF + \Delta NF_3 + M_3 \cos(\theta_{(x,y)} + \alpha_{ps(x,y)} + \bar{\alpha}_{ps(x,y)} + 2\Delta S\alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 8)$$

(referência com ângulo de fase deslocado em +180°)

$$I'_{180ref}(x,y) = NF + \Delta NF'_3 + M'_3 \cos[\theta_{(x,y)} - 2(\alpha_{ps(x,y)} + \bar{\alpha}_{ps(x,y)} + 2\Delta S\alpha_{ps(x,y)})] \quad (A3. 9)$$

(referência com ângulo de fase deslocado em -180°)

$$I_{270ref}(x,y) = NF + \Delta NF_3 + M_3 \cos(\theta_{(x,y)} + 2\alpha_{ps(x,y)} + \bar{\alpha}_{ps(x,y)} + 2\Delta S\alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 10)$$

(referência com ângulo de fase deslocado em +270°)

Considerando uma deformação que determina uma alteração  $\delta_{(x,y)}$  no ângulo de fase inicial, estado deformado fica caracterizado pelos seguintes interferogramas:

$$I_{0def}(x,y,t) = NF + \Delta NF_1 + DRIFT + M_1 \cos(\theta_{ref(x,y)} + \delta_{(x,y)}) \quad (A3. 11)$$

(estado deformado)

$$I_{90def}(x,y,t) = NF + \Delta NF_2 + DRIFT + M_2 \cos(\theta_{(x,y)} + \bar{\alpha}_{ps(x,y)} + \Delta S\alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 12)$$

(estado deformado com ângulo de fase deslocado em +90°)

$$I'_{90def}(x,y,t) = NF + \Delta NF'_2 + DRIFT' + M'_2 \cos(\theta_{(x,y)} - \bar{\alpha}_{ps(x,y)} - \Delta S\alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 13)$$

(estado deformado com ângulo de fase deslocado em +90°)

$$I_{180def}(x,y,t) = NF + \Delta NF_3 + DRIFT + M_3 \cos(\theta_{(x,y)} + \alpha_{ps} + \bar{\alpha}_{ps(x,y)} + \Delta S\alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 14)$$

(estado deformado com ângulo de fase deslocado em +180°)

$$I'_{180def}(x,y,t) = NF + \Delta NF'_3 + M'_3 \cos[\theta_{(x,y)} + \delta_{(x,y)} - 2(\alpha_{ps(x,y)} + \bar{\alpha}_{ps(x,y)} + 2\Delta S\alpha_{ps(x,y)})] \quad (A3. 15)$$

(estado deformado com ângulo de fase deslocado em -180°)

$$I_{270def}(x,y,t) = NF + \Delta NF_4 + DRIFT + M_4 \cos(\theta_{(x,y)} + \alpha_{ps} + \bar{\alpha}_{ps(x,y)} + \Delta S\alpha_{ps(x,y)}) \quad (A3. 16)$$

(estado deformado com ângulo de fase deslocado em +270°)

### **Algoritmos de 3 passos**

a) *Radial*

$$\delta_{(x,y)} = a \tan \left[ \frac{(I'_{90ref} - I_{90ref})(I_{270def} + I_{90def} - 2I_{0def}) - (I'_{90def} - I_{2def})(I'_{90ref} + I_{0ref} - 2I_{0ref})}{(I'_{90ref} - I_{90ref})(I'_{90def} - I_{90def}) + (I'_{90ref} + I_{90ref} - 2I_{0ref})(I'_{90def} + I_{90def} - 2I_{0def})} \right] \quad (A3. 17)$$

b) *3 passos*

$$\theta_{(x,y)} = \frac{\pi}{4} + a \tan \left( \frac{I_{180ref} - I_{90ref}}{I_{0ref} - I_{90ref}} \right) \quad (A3. 18)$$

$$\theta_{(x,y)} + \delta_{(x,y)} = \frac{\pi}{4} + a \tan \left( \frac{I_{180def} - I_{90def}}{I_{0def} - I_{90def}} \right) \quad (A3. 19)$$

c) *3 passos proposto por Joenathan*

$$\theta_{(x,y)} = a \tan \left( \frac{I_{180ref} - 2I_{90ref} + I_{0ref}}{I_{0ref} - I_{180ref}} \right) \quad (A3. 20)$$

$$\theta_{(x,y)} + \delta_{(x,y)} = a \tan \left( \frac{I_{180def} - 2I_{90def} + I_{0def}}{I_{0def} - I_{180def}} \right) \quad (A3. 21)$$

d) *3 Passos, referência deslocada em  $-\alpha$*

$$\theta_{(x,y)} = a \tan \left( \frac{I_{90ref} - I_{0ref}}{I'_{90ref} - I_{0ref}} \right) \quad (A3. 22)$$

$$\theta_{(x,y)} + \delta_{(x,y)} = a \tan \left( \frac{I_{90def} - I_{0def}}{I'_{90def} - I_{0def}} \right) \quad (A3. 23)$$

e) *3 passos Joenathan, referência deslocada em  $-\alpha$*

$$\theta_{(x,y)} = a \tan \left( \frac{I_{90ref} - 2I_{0ref} + I'_{90ref}}{I'_{90ref} - I_{90ref}} \right) \quad (A3. 24)$$

$$\theta_{(x,y)} = a \tan \left( \frac{I_{90ref} - 2I_{0ref} + I'_{90ref}}{I'_{90ref} - I_{90ref}} \right) \quad (A3. 25)$$

f) 3 passos proposto por Viskram,

Neste algoritmo não é necessário conhecer o ângulo  $\alpha$ , apenas o sinal do coseno. Desta forma o ângulo de deslocamento de fase pode variar ao longo do campo de medição, desde que mantenha o mesmo comportamento sobre cada ponto.

$$P = \frac{I'_{90def} - I_{90def}}{I'_{90ref} - I_{90ref}} \quad (A3. 26)$$

$$Q = \frac{(I'_{90def} - I_{0def}) + (I_{90def} - I_{0def})}{(I_{90ref} - I_{0ref}) + (I'_{90ref} - I_{0ref})} \quad (A3. 27)$$

$$\delta_{(x,y)} = a \cos \frac{PQ + 1}{P + Q} \quad (A3. 28)$$

O valor correto de  $\delta_{(x,y)}$  no círculo trigonométrico é determinado através do procedimento a seguir. O sinal do coseno de  $\theta_{(x,y)}$  é determinado, assumindo que o sinal do coseno de  $\alpha$  seja conhecido, pela equação:

$$\cos \theta_{(x,y)} = \frac{I'_{90ref} + I_{90ref} - 2I_{0ref}}{2M(\cos \alpha_{ps} - 1)} \quad (A3. 29)$$

O sinal do seno de  $\theta_{(x,y)}$  pode ser determinado por:

$$\sin \theta_{(x,y)} = \frac{I'_{90ref} - I_{90ref}}{2M \sin \alpha_{ps}} \quad (A3. 30)$$

O sinal de  $\delta_{(x,y)}$  pode, finalmente, ser determinado por:

$$\text{sen } \delta_{(x,y)} = \frac{Q - \cos \delta_{(x,y)}}{-\tan \theta_{(x,y)}} \quad (\text{A3. 31})$$

### **Algoritmo de 4 passos**

#### **g) Algoritmo 4 passos clássico**

$$\theta_{(x,y)} = \frac{I_{270\text{ref}} - I_{90\text{ref}}}{I_{0\text{ref}} - I_{180\text{ref}}} \quad (\text{A3. 32})$$

$$\theta_{(x,y)} + \delta_{(x,y)} = \frac{I_{270\text{def}} - I_{90\text{def}}}{I_{0\text{def}} - I_{180\text{def}}} \quad (\text{A3. 33})$$

### **Algoritmo de 5 passos**

#### **g) Algoritmo proposto por Schwider**

$$\theta_{(x,y)} = \frac{2(I'_{90\text{ref}} - I_{90\text{ref}})}{2I_{0\text{ref}} - I_{180\text{ref}} - I'_{180\text{ref}}} \quad (\text{A3. 34})$$

$$\theta_{(x,y)} + \delta_{(x,y)} = \frac{2(I'_{90\text{def}} - I_{90\text{def}})}{2I_{0\text{def}} - I_{180\text{def}} - I'_{180\text{def}}} \quad (\text{A3. 35})$$

A Tabela A3. 2 e a Tabela A3. 1, mostram o comportamento dos diversos algoritmos frente aos parâmetros de influência mais críticos.

A simulações foram feitas considerando 1000 pontos para cada algoritmo. Desta forma, o valor do ângulo de deformação calculado é expresso através de um valor médio e do desvio padrão da distribuição. Os resultados obtidos mostram que vários algoritmos podem ser utilizados, dependendo de quais sejam os parâmetros mais críticos numa determinada medição. O algoritmo de Viskram é especialmente indicado quando o ângulo de deslocamento de fase não é conhecido. Os algoritmos de três passos são indicados quando não se dispõe de um sistema que permita gerar grandes ângulos de deslocamentos de fase. Por outro lado, quando os parâmetros anteriores



não forem críticos, o algoritmo proposto por Schwider é o mais indicado para ser utilizado em conjunto com o interferômetro radial.

Os valores de modulação e nível de fundo considerados nos cálculos seguem os dados apresentados por Kapp<sup>[83]</sup>.

Nível de Fundo (níveis de cinza, 8 bits)	Modulação (M)	Desvio Padrão ( $\sigma_M$ )
50	11,5	7,43
75	15,3	11,0
100	20,2	14,8
125	28,5	21,2

Tabela A3. 1 - Valores típicos de nível de fundo e modulação obtidos no sistema “Estação Holográfica”

	Dados de Entrada												Saída	
	$\theta_{(x,y)}$	$\delta_{(x,y)}$	NF	$\Delta NF$		$\Delta M$		$\alpha$			DRIFT		Erro	
Algoritmos				$\overline{\Delta NF}$	$L_{\Delta NF}$	$\overline{M}$	$\sigma_M$	$\overline{\alpha}_{ps}$	$\sigma_\alpha$	$\Delta S_\alpha$	$\overline{D}$	$\sigma_D$	$\Delta \overline{\delta}_{calc}$	$\sigma_{\Delta \delta}$
Radial	30	75	125	0	5	28,5	21,2	90	1	2	1%	2	54,5	72,5
3 Passos	30	75	125	0	5	28,5	21,2	90	1	2	1%	2	43,3	50,0
3 Passos Joenathan	30	75	125	0	5	28,5	21,2	90	1	2	1%	2	43,3	50,0
3 Passos Ref. $\sim \alpha$	30	75	125	0	5	28,5	21,2	90	1	2	1%	2	54,5	72,5
3 Passos Joenathan Ref. $\sim \alpha$	30	75	125	0	5	28,5	21,2	90	1	2	1%	2	43,3	50,0
3 Passos Viskram	30	75	125	0	5	28,5	21,2	90	1	2	1%	2	62,7	79,5
4 Passos	30	75	125	0	5	28,5	21,2	90	1	2	1%	2	28,1	41,4
Schwider	30	75	125	0	5	28,5	21,2	90	1	2	1%	2	24,5	32,6

Tabela A3. 2 - Comportamento de diversos algoritmos frente a parâmetros típicos

	Dados de Entrada												Saída	
	$\theta_{(x,y)}$	$\delta_{(x,y)}$	NF	$\Delta NF$		$\Delta M$		$\alpha$			DRIFT		Erro	
Algoritmos				$\overline{\Delta NF}$	$L_{\Delta NF}$	$\overline{M}$	$\sigma_M$	$\overline{\alpha}$	$\sigma_\alpha$	$\Delta S_\alpha$	$\overline{D}$	$\sigma_D$	$\Delta \overline{\delta}_{calc}$	$\sigma_{\Delta \delta}$
Radial	30	75	125	0	5	28,5	5	90	2	5	1%	2	10,5	7,7
3 Passos	30	75	125	0	5	28,5	5	90	2	5	1%	2	9,2	7,0
3 Passos Joenathan	30	75	125	0	5	28,5	5	90	2	5	1%	2	9,2	7,0
3 Passos Ref. - $\alpha$	30	75	125	0	5	28,5	5	90	2	5	1%	2	10,5	7,7
3 Passos Joenathan Ref. - $\alpha$	30	75	125	0	5	28,5	5	90	2	5	1%	2	10,5	7,7
3 Passos Viskram	30	75	125	0	5	28,5	5	90	2	5	1%	2	17,0	26,3
4 Passos	30	75	125	0	5	28,5	5	90	2	5	1%	2	7,0	5,3
Schwider	30	75	125	0	5	28,5	5	90	2	5	1%	2	6,0	4,4

Tabela A3. 3 - Comportamento de diversos algoritmos frente a parâmetros típicos

Comparando os resultados da Tabela A3. 2 e da Tabela A3. 3, percebe-se a importância de utilizar algoritmos que ponderem a modulação dos píxeis durante o processamento. Neste caso, píxeis com coeficiente de modulação elevado teriam maior “peso” no processamento do que aqueles com baixo coeficiente de modulação.

## **ANEXO 4**

### ***Estrutura e Funcionamento do Programa de Aquisição e Processamento do MATER***

Tanto o desenvolvimento do algoritmo de aquisição e processamento <sup>[ 54 ]</sup> como a operacionalização<sup>62</sup> do software em linguagem *VisualBasic*® fogem ao escopo desta dissertação. Entretanto para que se possa ter uma idéia do funcionamento global do sistema de medição, uma breve descrição do software de aquisição será mostrada.

O programa de computador do MATER foi organizado de forma a guiar o usuário passo a passo na execução de um ensaio, com o mínimo de envolvimento do operador com aspectos técnicos mais avançados. Basicamente para medir tensões residuais é necessário selecionar a opção "Run". O programa apresenta seqüencialmente uma série de instruções e comandos necessários para efetuar as medições passo a passo nas várias etapas da medição. Dispõe ainda de algumas ferramentas de ajuste da imagem e de visualização de resultados que podem ser acessadas em várias instâncias.

Em resumo, a execução do programa segue a seqüência abaixo:

- *passo 1*: define-se a configuração do ensaio. Um cabeçalho deve ser preenchido e o material sendo ensaiado deve ser selecionado de (ou acrescentado a) uma lista, onde constam suas propriedades elásticas.
- *passo 2*: ajuste da imagem com o sistema óptico normal.
- *passo 3*: instalação da lupa e aquisição de imagem ampliada da superfície onde será efetuado o furo. Esta imagem é usada posteriormente para determinar o diâmetro do furo.
- *passo 4*: instalação do sistema óptico normal e aquisição do mapa de fases inicial.
- *passo 5*: instalação do sistema de furação e registro da leitura inicial do colar micrométrico de controle do avanço da furadeira.
- *passo 6*: furação e registro da leitura final do colar de controle do avanço da

---

<sup>62</sup> A operacionalização do software foi feita pelo professor Albertazzi e membros da equipe da Fundação CERTI alocados no projeto no qual esta dissertação se insere.

furadeira.

- *passo 7*: instalação do sistema óptico normal e aquisição do mapa de fases final.

- *passo 8*: instalação da lupa e aquisição da imagem ampliada do furo.

- *passo 9*: medição do diâmetro do furo através de ferramentas de processamento de imagens.

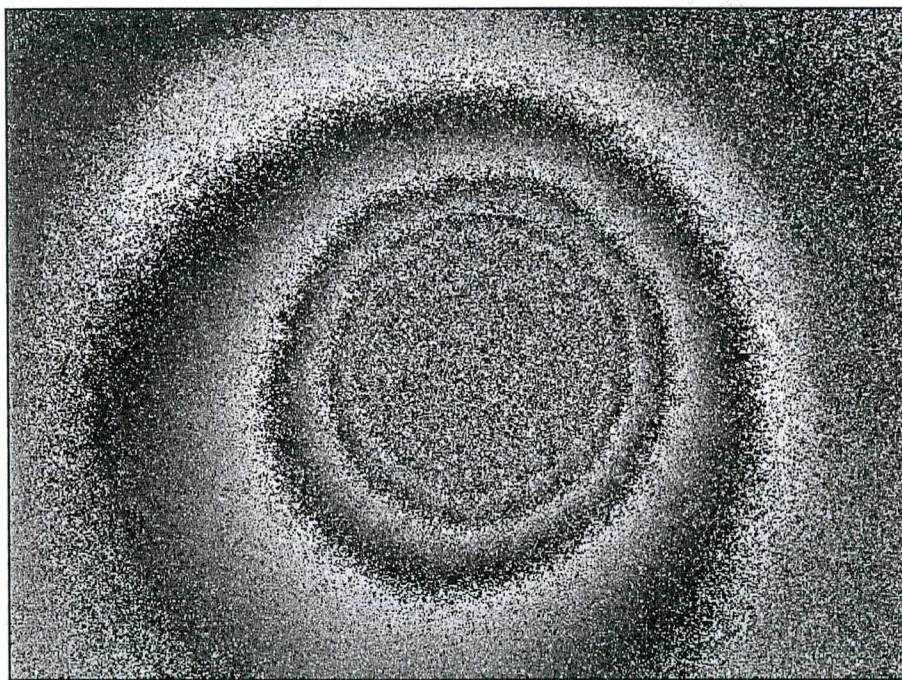
- *passo 10*: processamento - seleção dos parâmetros do filtro e acionamento do processamento automático dos dados e apresentação do relatório de medição

## ANEXO 5

### ***Imagens de Medições de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica e o Interferômetro Radial***

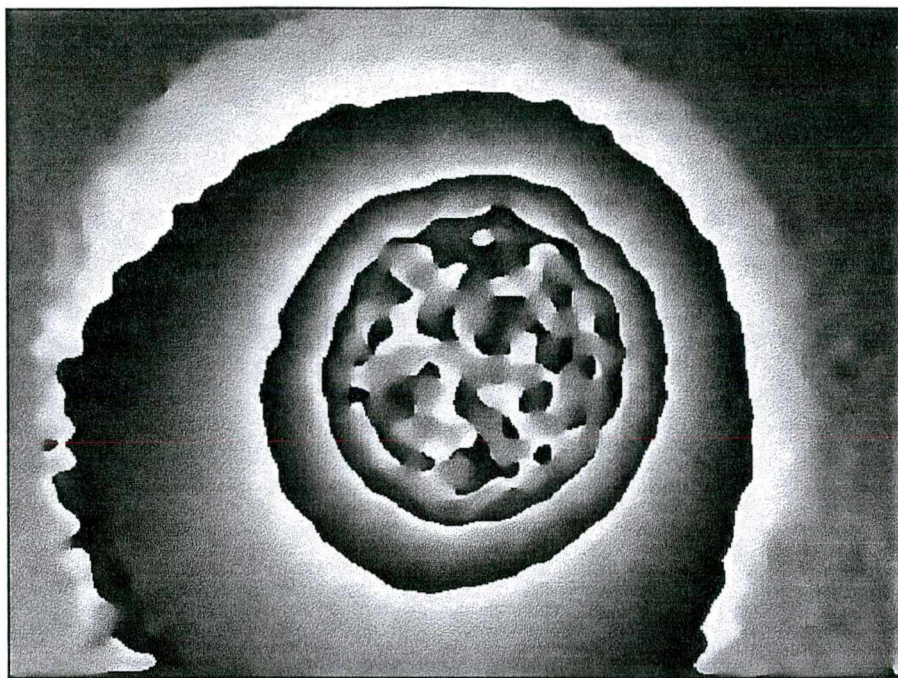
As figuras a seguir mostram resultados experimentais obtidos na medição de tensões residuais usando a holografia eletrônica, o interferômetro radial desenvolvido e o método do furo.

A técnica consiste em adquirir uma imagem que corresponda a um estado de referência da peça que será medida. A seguir, um pequeno furo é introduzido no objeto que, devido ao estado de tensões a que está submetido, apresenta um campo de deslocamentos proporcional. Uma nova imagem é adquirida e subtraída da imagem de referência. O resultado é uma mapa de franjas (ou fase) que quantifica o campo radial de deslocamentos sofrido e, por consequência, o estado de tensões.

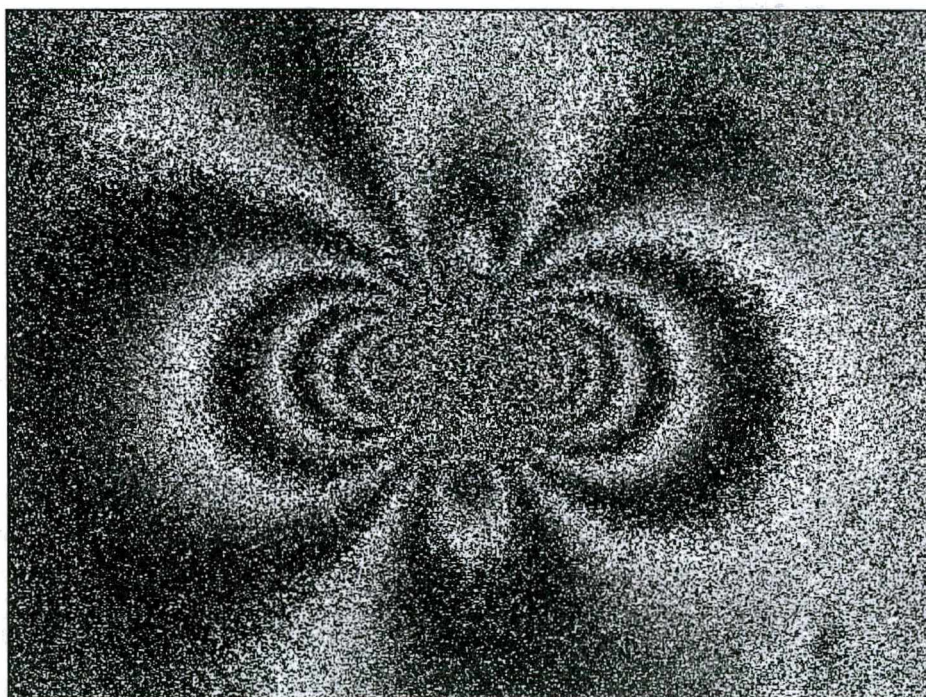


*Figura A5. 1 - Mapa de Fases (não -filtrado) obtido em ensaios utilizando o interferômetro radial. A imagem corresponde a um estado equibiaxial de tensões.*



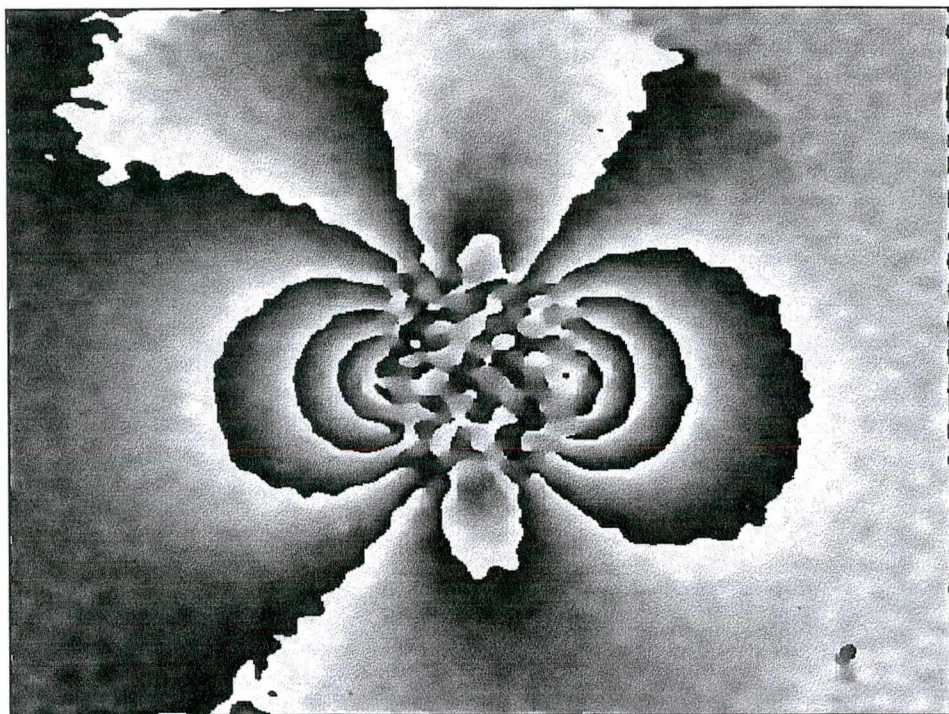


*Figura A5. 2 - Mapa de fases da figura anterior filtrado*



*Figura A5. 3 - Mapa de fases (não filtrado) que corresponde a um estado de tensão uniaxial de tração*





*Figura A5. 4 - Mapa de fases da figura anterior filtrado*

## 9. Referências Bibliográficas

1. MACHERAUCH, E. Introduction to Residual Stress
2. TIETZ, H. D. *Grundlagen der Eigenspannungen*, VEB Deutscher Verlag Grundstoffindustrie, Leipzig, 1993.
3. BECK, G.; SIMON, A. *Prediction of Residual Stresses*.
4. YU, H. J., WOLFSTIEG, U., MACHERAUCH, E. *Berechnung von Eigenspannungen mit Hilfe eines speziellen Finite-Element-Programms*, Arch. Eisenhüttewes, No. 49, pp. 499, 1978.
5. MORTON, J.; POST, D.; HAN, B.; TSAI, M. Y. *A Localized Hybrid Method of Stress Analysis: a Combination of Moiré Interferometry and FEM*. Experimental Mechanics, pp. 195 - 200, June 1990.
6. CHERN, Engmin. *Eddy Current Residual Stress Measuring System*. Technology 2005 Conference, Chicago, Illinois, 1995.
7. HAUKE, Viktor. *Non-destructive Methods of Measurement of Residual Stresses*.
8. HAUKE, Viktor. *X-Ray Methods for Measuring Residual Stresses*.
9. HAUKE, V.; VAESSEN, G. *Röntgenographische Spannungsermittlung an texturierten Stählen*, 1983.
10. KRAWITZ, A. D. et al. *Measurements of Stress in the Interior of Solids with Neutrons*.
11. PINTSCHOVUS, L.; MACHERAUCH, E. *Eigenspannungen und Lastspannungen, Moderne Ermittlung - Ergebnisse - Bewertung*. HTM Beiheft Carl Hanser Verlag München Wien, 1982.
12. TEC Model 1630-3 Stress Analyzer Catalog.
13. Neutron Powder Diffractometer, Los Alamos National Laboratory.
14. SCHNEIDER, E. et al. *Nondestructive Detection and Analysis of Stress States with Polarized Ultrasonic Waves*, in "Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation", vol. 4 B, 1079-1088.
15. KOBAYASHI, A. S. *Handbook on Experimental Mechanics*. Prentice-Hall, New Jersey, pp. 793 - 797, 1987.
16. RUUD, C. et al. *Comparison of Three Residual Stress Measurement Methods on a Mild Steel Bar*. Experimental Mechanics, 338 -343, December 1985.
17. TABEDGE, N.; ALPSTEN, G.; TALL, L. *Residual Stress Measurement by the Sectioning Method*. Experimental Mechanics, 1973.
18. PROCTER, E.; MITCHELL, P. H. *Investigation of Machining Stresses on a Large Alternator Rotor*. Proc. SESA, Cleveland, Ohio, pp.345-349, 1983.
19. WOLF, H.; BÖHM, W. *The Ring-Core Method for Measuring Residual Stresses and its Use with Turbines and Generator Shafts*. Arch. Eisenhüttenwesen 42, pp. 195-200, 1971.
20. BÖHM, W.; STUCKER, E.; WOLF, H. *Principles and Application of the Ring-Core Method for Determining Residual Stresses*. Messtechnische Briefe 16, Vol. 2, 1980.

21. CHENG, W.; FINNIE, I.; PRIME, M. B. *Measurement of Residual Stresses Through the Thickness of a Strip Using the Crack Compliance Method*. Residual Stresses III - Science and Technology, Proceedings of the Third International Conference on Residual Stresses, Vol. 2, Elsevier Applied Science, Ed. H. Fujiwara et al., pp. 1127-1132, 1992.
22. CHENG, W.; FINNIE, I. *An Overview of the Crack Compliance Method for Residual Stress Measurement*. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Residual Stress, Society for Experimental Mechanics, Bethel CT, pp. 449-458, 1994.
23. MATHAR, J. *Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes*. ASME Vol. 56, No. 4, 249 -254, 1934.
24. SOETE, W.; VANCROMBRUGGE, R. *An Industrial Method for the Determination of Residual Stresses*. Proceedings of SESA, Vol. 8, No. 8, 17-28, 1952.
25. RENDLER, N. J.; VIGNESS, I. *Hole-Drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses*. Experimental Mechanics, Vol. 6, No. 12, 577-586, 1966.
26. ASTM E837 - 92 *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain-gage Method*. Annual Book of ASTM Standards, 1992.
27. KIRSCH, G. *Theory of Elasticity and Application in Strength of Materials*, in "Zeitschrift Verein deutscher Ingenieure", No. 29, 797-807, 1898.
28. SHAJER, G. S. *Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements*. Journal of Engineering Materials and Technology, 157-163, 1981.
29. *Measurement of Residual Stresses by the Hole-drilling Strain Gage Method*. Measurements Group Technical Note.
30. SCHWARZ, T.; KOCKELMANN, H. *Die Bohrlochmethode - ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen ermittlung von Eigenspannungen*. HBM Messtechnische Briefe 29, Heft 2, pp. 33 - 38, 1993.
31. DALLY, J. W.; RILEY, W. F. *Experimental Stress Analysis*, Third edition. McGraw-Hill International Editions, 1991.
32. SHAJER, G. S.; YANG, L. *Residual-stress Measurement in Orthotropic Materials Using the Hole-drilling Method*. Experimental Mechanics, pp. 324 - 333, December 1994.
33. SCHAJER, G. S. *Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I - Stress Calculation Procedures*. Journal of Engineering Materials and Technology - Transactions of the ASME, Vol. 110, pp. 338 - 349, October 1988.
34. NIKU-LARI, A.; LU, J.; FLAVENOT, J.F. *Measurement of Residual Stress Distribution by the Incremental Hole-drilling Method*. Experimental Mechanics, pp. 175 - 185, June 1985.
35. NELSON, D. V.; FUCHS, E. A.; MAKINO, A. *An Overview of the Holographic Hole-drilling Technique for Residual Stress Measurement*. pp. 63 - 72.
36. KELSEY, R. A. *Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method*. S.E.S.A. Proceedings, Vol. XIV, No. 1, pp. 181 - 194.

37. NIKU-LARI, A.; LU, J.; FLAVENOT, J.F. *Measurement of Residual Stress Distribution by the Incremental Hole-drilling Method.*
38. LU, J.; FLAVENOT, J.F. *Applications of the Incremental Hole-drilling Method for Measurement of Residual-stress Distribution.* Experimental Techniques, pp.18-24, November 1989.
39. ROY, G. *The Effect of Machining Stresses on Residual Stress Determination by the Hole Drilling Method.* pp.384 - 388.
40. PREVEY, Paul S. *Residual Stress Distributions Produced by Strain Gage Surface Preparation* Experimental Mechanics , pp. 92 - 97, March 1988.
41. BUSH, A. J.; KROMER, F. J. *Simplification of the Hole-iDrilling Method of Residual Stress Measurement.* Inst. Soc. America Trans. 112, pp. 249.
42. FLAMAN, M. T.; HERRING, J. A. *Comparison of Four Hole-producing Techniques for the Center Hole Residual Stress Measurement Method.* Experimental techniques, Vol. 9, No. 8, pp. 30-32, 1985.
43. PROCTER, E.; BEANEY, E. M. *The Trepan or Ring Core Method, Centre-hole Method, Sach's Method, Blind Hole Methods, Deep Hole Technique.* pp. 165 - 198.
44. KELSEY, R. A. *Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole-drilling Method.* SESA Proceedings, Vol. 14, No. 1 pp.181.
45. BATHGATE, R. G. *Measurement of Non-uniform Bi-axial Residual Stresses by the Hole Drilling Method.* Strain, Vol. 4, No. 2, 1968.
46. REDNER, S.; PERRY, C. C. *Factors Affecting the Accuracy of Residual Stress Measurements Using the Blind-hole Drilling Method.* Measurements Group Inc.
47. KABIRI, M. *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method: Influences of Transverse Sensitivity of the Gages and Relieved Strain Coefficients.* Experimental Mechanics, pp. 252-256, September 1984.
48. CAPPA, P. *Uncertainty Associated with the Gage Factor in Three-Element Strain-gage-rosette Measurements.* Experimental Mechanics, pp. 429 -431, December 1987.
48. MAKINO, A.; NELSON, D. *Residual-stress Determination by Single-axis Holographic Interferometry and Hole-drilling - Part I: Theory.* Experimental Mechanics, pp. 66 - 78, March 1964.
49. HUNG, Y. Y.; LONG, K. W.; HOVANESIAN, J. D. *Fast Detection of Residual Stresses in an Industrial Environment by Electronic Shearography.* 1990 Hologram Interferometry and Speckle Metrology Proceedings, pp. 134 - 139, 1990.
51. NELSON, D. V.; FUCHS, E. A.; MAKINO, A.; WILLIAMS, D. R. *Residual-stress Determination by Single-axis Holographic Interferometry and Hole-drilling - Part II: Experiments.* Experimental Mechanics, pp. 79-88, March 1994.
52. MAKINO, A.; NELSON, D. V.; FUCHS, E. A.; WILLIAMS, D. R. *Measurement of Biaxial Residual Stresses Using the Holographic-hole Drilling Technique.* 1993 SEM, pp. 482 - 491, 1993.



53. NICOLETTO, G. *Moiré Interferometry Determination of Residual Stresses in the Presence of Gradients*. Experimental Mechanics, pp. 252-256, September 1991.
54. ALBERTAZZI JR., A.; RODACOSKI, M. R. *Algoritmos para Quantificação de Tensões Residuais por Holografia Eletrônica Usando um Interferômetro Radial*. Anais do IV Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Rio de Janeiro, 1996.
55. ALBERTAZZI JR., A.; KANDA, C.; BOETTGER, J. *Adequação de um Interferômetro Radial para Medição de Tensões Residuais por meio da Holografia Eletrônica*. III Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Rio de Janeiro, 1995.
56. ALBERTAZZI, A.; KANDA, C.; BOETTGER, J.; RODACOSKI, M. R. *Residual Stresses Measurement Using a Radial Intereferometer - a Preliminary Analysis*. Proceedings of the VIII International Congress on Experimental Mechanics, pp. 27 - 28, June 1996.
57. ALBERTAZZI, A.; BOETTGER, J.; KANDA, C. *Medição de Tensões Residuais pelo Método do Furo: Uma Comparação entre Extensometria e Holografia*. IV Simpósio de Análise Experimental de Tensões, Rio de Janeiro, pp. 125-128, Novembro de 1996.
58. SANDIFER, J. P.; BOWIE, G.E. *Residual Stress by Blind-hole Method with Off-centre Hole*. Experimental Mechanics, pp. 173-179, May 1978.
59. WANG, J. *Refined Analysis of the Relieved Strain Coefficients for the Off-center Hole-drilling Case*. Experimental Mechanics, pp. 367-371, December 1990.
60. AJOVALASIT, A. *Measurement of Residual Stresses by the Hole-drilling Method: Influence of Hole Eccentricity*. Journal of Strain Analysis, Vol. 14, No. 4, pp. 171-178, 1979.
60. DVC Video Company - Frequently Asked Questions.
61. DAINITY, J. C. *Laser Speckle and Related Phenomena*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg , Germany, 1975.
62. GOODMAN, J. W. *Some Fundamental Properties of Speckle*. J. Opt. Soc. Am., Vol. 66, No. 11, pp. 1145 - 1150, Novembro de 1976.
64. HAFERKORN, H. *Optik - Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1980.
64. LEENDERTZ, J. A.; *Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect*. J. Physics. E: (Sci. Instrum.) 3, pp. 214-218, 1970.
66. GASVIK, K. J. *Optical Metrology*. John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> Edition, 1995.
67. SCHROETER, R. B. *Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro Infravermelho*. Exame de Qualificação para doutoramento submetido à Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, Dezembro de 1996.
68. DAY, Ronald G. *Quality Function Deployment: Linking a Company with Its Customers*. ASQC Quality Press. Milwaukee, Wisconsin, 1993.
69. MELOZZI, M.; PEZZATI, L.; MAZZONI, A. *Vibration-insensitive Interferometer for On-line Measurements*. Applied Optics, Vol. 34, No. 25, pp. 5595-5601, 1 September 1995.

70. WULICH, D.; KOPEIKA, N. S. *Image Resolution Limits Resulting from Mechanical Vibrations*. Opt. Eng. 26, pp. 529-533, 1987.
71. WIZINOWICH, P. L. *Phase Shifting Interferometry in the Presence of Vibration: a New Algorithm and System*. Applied Optics, Vol. 29, No. 22, pp. 3271-3279, 1 August 1990.
72. COLUCCI, D.; WIZINOWICH, P. *Milisecond Phase Acquisition at Video Rates*. Applied Optics, Vol. 31, No. 28, pp. 5919-5924, 1 October 1992.
73. MELLOZI, M.; PEZZATI, L.; MAZZONI, A. *Vibration-insensitive Interferometer for On-line Measurements*. Applied Optics, Vol. 34, No. 25, pp. 5595-5601, 1 September 1995.
74. ALBERTAZZI JR., A.; KAPP, W. A.; RODACOSKI, M. R. *Concepção Básica de uma Estação de Medição de Deformações e Tensões por Princípios Holográficos*. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, pp. 61-64, Dezembro de 1991.
75. KRAUSE, W. *Konstruktionslemente der Feinmechanik*. VEB Verlag Technik Berlin, 1989.
76. HILDEBRAND, S. *Feinmechanische Bauelemente*. Carl Hanser Verlag, Berlin, 1980.
77. DAVISON, A. *Handbook of Precision Engineering - Vol. 5 - Joint Techniques*, McGraw-Hill Books Company, Eindhoven, 1972.
78. SKF Plain Bearings Catalogue, 1990.
79. KINNSTAETTER, K.; LOHMANN, A. W.; SCHWIDER, J.; STREIBL, N. *Accuracy of Phase Shifting Interferometry*. Applied Optics, 27, pp. 5082-5089, 1988.
80. PIEZO SYSTEMS, Inc. Product Catalog.
81. MORGAN MATROC, Inc. *Guide to Modern Piezoelectric Ceramics*.
82. VISKRAM, C. S.; WITHEROW, W. K.; TROLINGER, J. D. *Algorithm for Phase-difference Measurement in Phase-shifting Interferometry*. Applied Optics, Vol. 32, No. 31, pp. 6250-6252. 1 November 1993.
83. WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. *Tecnologia da Usinagem do Alumínio e suas Ligas*. 2ª Edição, São Paulo, Alcan Alumínio do Brasil, 1991.
84. AI, C.; WYANT, J. C. *Effect of Piezoelectric Transducer Nonlinearity of Phase Shift Interferometry*. Applied Optics, Vol. 26, No. 6, 15 March 1987.
85. JOENATHAN, C. *Phase-measuring Interferometry: New Methods and Error Analysis*. Applied Optics, Vol. 33, No. 19, pp. 4147-4155, 1 July 1994.